

Pekka Helenius

Pistetiedon mallinnus merenmittauksen aineistonkäsittelyssä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

20.11.2016

Tekijä Otsikko	Pekka Helenius Pistetiedon mallinnus merenmittauksen aineistonkäsittelyssä
Sivumäärä Aika	99 sivua 20.11.2016
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	työpäällikkö Hanno Kurtti yliopettaja Jussi Laari
<p>Insinöörityössä tutkittiin kolmiulotteisten mallinnusmenetelmien soveltuvuutta vedenalaisen mittausaineistoon ja vedenpäälliseen laserkeilausaineistoon.</p> <p>Työssä tavoitteena oli löytää menetelmiä, jotka antaisivat mitatulle aineistolle lisäarvoa ja tarjoaisivat sille jatkokäyttömahdollisuuksia. Pääasiallinen kiinnostuksen kohde oli kolmiulotteisissa malleissa, jotka tuotettiin monikulmioverkkoina ennalta valittuja mallinnusalgoritmeja ja alkuperäistä pisteaineistoa käyttäen. Monet tekijät vaikuttavat merenmittausaineiston mallinnusprosessiin, minkä takia vedenalaisen mittauksen teoreettista taustaa käsiteltiin työssä tarpeellisin osin.</p> <p>Työssä tuotettiin lähtöaineiston kohteista raskaita ja kevyitä malleja erityyppisillä vektori- ja rasteripohjaisilla mallinnusmenetelmillä. Mallinnusmenetelmien soveltuvuuden arviointiin vaikutti mitattujen kohteiden vaihtelevuus sekä ennalta määrättyt kriteerit, jotka asetettiin mallintamisen laadulle sekä prosessointityölle. Menetelmien hyödynnettävyyttä arvioitiin tuotettujen mallien laadun, koon, oikeamuotoisuuden ja muiden vastaavien tekijöiden pohjalta.</p> <p>Insinöörityö tarjoaa ohjeita ja suosituksia, joita voidaan hyödyntää pisteaineiston käsittelyprosessissa sekä muissa vastaavanlaisissa käyttökohteissa.</p>	
Avainsanat	pistepilvi, mallintaminen, kolmiointi, merenmittaus, laserkeilaus, monikeilaus, vektorimalli, ruutumalli

Author Title Number of Pages Date	Pekka Helenius Modelling of point cloud data in hydrographic data processing workflow 99 pages 20 November 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Hanno Kurtti, Manager Jussi Laari, Principal Lecturer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to establish the suitability of three dimensional modelling methods to hydrographic survey data on one hand and laser scanning data acquired from above the surface of water on the other hand.</p> <p>The final year project intended to find methods to increase the value of and possibilities to use the data. Especially three dimensional polygonal models produced from raw point cloud data as origin were of interest. Polygonal models were formed with multiple prechosen modelling algorithms applied to the survey data. To understand the role of multiple factors necessary to take into account in the modelling process, the basic theory of multibeam surveying was studied.</p> <p>Both heavy and light three dimensional models were produced from the original source data with vector and raster based modelling methods. The evaluation of the modelling methods was affected by the variability of the surveyed objects and by the predefined criteria for the modelling quality and the process. The usefulness of the methods was estimated by assessing the quality, size, shape correctness and other similar factors of the modelled objects.</p> <p>The Bachelor's thesis provides instructions and recommendations which can be adapted in point cloud processing as well as in other related environments.</p>	
Keywords	point cloud, modelling, triangulation, hydrographic surveying, laser scanning, multibeam, vector model, raster model

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Tutkimuskohde	1
2.1	Taipaleen kanava	1
2.1.1	Historia	2
2.1.2	Teknisiä tietoja	3
2.2	Kanava mittauskohteena	5
2.2.1	Mittauksen toteuttaja	5
2.2.2	Tuotettu mittausaineisto	5
2.2.3	Mittauksen tarkoitus	6
3	Käytetyt mittaustekniikat	7
3.1	Kaikuluotaus	7
3.1.1	Ääniaallot vedessä	8
3.1.2	Ääniaaltojen hävikki	10
3.1.3	Kaikuluotaimen rakenne	11
3.2	Yksikanavainen kaikuluotain	11
3.3	Monikanavainen kaikuluotain eli monikeilain	13
3.4	Laserkeilaus	15
3.4.1	Toimintaperiaate	15
3.4.2	Mittaustavat	16
3.5	Mittausaluksen paikan-, asennon- ja suunnanmäärittystekniikat	17
3.5.1	Paikan- ja suunnanmäärittäminen	17
3.5.2	Asennonmäärittäminen	19
4	Mittausaineiston laatutekijät	21
4.1	Virheet ja tarkkuus	21
4.1.1	Vedenalaisiin prosesseihin liittyvät virhetekijät	21
4.1.2	Kaikuluotaintekniikkaan liittyvät virhetekijät	21
4.1.3	Keilaussäde ja pohjatopografian resoluutio	24
4.1.4	Mittausolosuhteisiin liittyvät tarkkuustekijät	26
4.2	Katvealueet	27
4.3	Kaikupisteiden virheiden prosessointi	29
5	Käytetyt paikkatietomallit	30

5.1	Paikkatietomallin määritelmä	30
5.2	Paikkatietomallien valintakriteerit	31
5.3	Digitaalinen pinta-, maasto- ja korkeusmalli	31
5.4	Pistepilvi	32
5.4.1	Pistepilven määritelmä	32
5.4.2	Pisteiden ominaisuudet	32
5.4.3	Pisteiden visualisointi	33
5.4.4	Pisteiden luokittelu	35
5.4.5	Taipaleen kanavan pohja-aineisto	36
5.4.6	Taipaleen kanavan vedenalaiset seinät	37
5.4.7	Taipaleen kanavan vedenpäällinen pisteaineisto	38
5.5	Vektorimalli	43
5.5.1	Rakenne	43
5.5.2	Epäsäännöllinen kolmioverkko	43
5.5.3	Monikulmioverkon tarkkuus	44
5.5.4	Monikulmioiden ja solmupisteiden määrä	45
5.5.5	Monikulmioverkon normaalivektorit	46
5.5.6	Monikulmioverkon diagonaalit	48
5.5.7	Kolmiointi ja monikulmioverkon rakenteen tarkkuus	49
5.5.8	Delaunayn kolmiointi	51
5.5.9	Poissonin pinnan uudelleenmuodostus	54
5.5.10	Manuaalinen murtoviivoitus	55
5.5.11	Monikulmioverkon teksturointi	55
5.5.12	Taipaleen kanavan pohjan vektorimallinnus	57
5.5.13	Taipaleen kanavan vedenalaisten seinien vektorimallinnus	64
5.5.14	Taipaleen kanavan vedenpäällisten osien vektorimallinnus	67
5.6	Ruutumalli	72
5.6.1	Rakenne	72
5.6.2	Korkeusrasteri	73
5.6.3	Tiedostokoko ja resoluutio	74
5.6.4	Taipaleen kanavan pohjan ruutumallinnus	75
5.6.5	Taipaleen kanavan vedenalaisten seinien ruutumallinnus	79
5.6.6	Taipaleen kanavan vedenpäällisten osien ruutumallinnus	82
6	Mallinnusmenetelmien arviointi	83
6.1	Mallinnusten reunaehdot	83
6.2	Käytetyt menetelmät	84
6.2.1	Taipaleen kanavan pohja	85
6.2.2	Taipaleen kanavan vedenalaiset seinät	87

6.2.3	Taipaleen kanavan vedenpäälliset osat	88
6.3	Käytetty prosessointiaika	90
7	Yhteenveto	91
	Lähteet	93

Lyhenteet ja käsitteet

absorptionhävikki	Absorption Loss (AL). Ääniaallon materiaaleihin imeytymisen seurauksena tapahtuvaa signaalin heikkenemistä.
adaptiivinen tihentäminen	Adaptive Mesh Refinement. Monikulmioverkkorakenteen paikallinen tihentäminen rakenteellisesti huonoissa verkon kohdissa, joissa monikulmioiden tai solmupisteiden määrä on kappaleen topografiaan nähden liian vähäinen.
algoritmi	Prosessin suorittamiseen käytettävä kuvaus, joka ratkaisee matemaattisesti määritellyn tai tietorakenteisiin liittyvän ongelman.
ALS	Aerial Laser Scanning. Ilmalaserkeilaus. Ilma-aluksesta toteutettava laserkeilaus.
artefakti	Informaation esittämisessä havaittava, digitaalisesta prosessoinnista aiheutuva virhe.
BeiDou	Kiinalainen satelliittipaikannusjärjestelmä.
CAD	Computer-Aided Design. Tietokonepohjainen, kaksi- tai kolmiulotteisessa suunnittelussa käytettävä mittatarkka rakenteiden piirtämistapa.
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System. Differentiaalinen satelliittipaikannusjärjestelmä. Mittausmenetelmä, jossa GNSS-vastaanottimella mitattuun sijaintitietoon liittyvää epätarkkuutta korjataan staattisen GNSS-tukiaseman mittaamalla paikanmäärittelyn korjaustiedolla. Korjaustieto välitetään tietokonepalvelimelta GNSS-vastaanottimeen.
Delaunayn kolmiointi	Delaunay Triangulation. Voronoin kaavioon pohjautuva monikulmion muodostusmenetelmä.

diagonaali	Lävistäjä (geometria). Monikulmion solmupisteiden välille muodostettava murtoviiva.
diagonaalinen muunnos	Samojen, ei-vierekkäisten solmupisteiden välille muodostettavien diagonaalien yhdistämistavan muunnos.
DOP	Dilution Of Precision. Havaittavan satelliittigeometrian tarkkuutta ilmaiseva lukuarvo, josta on olemassa ajan, tasokoordinaattien sekä korkeuden suhteen eri variaatioita.
DEM	Digital Elevation Model. Digitaalinen korkeusmalli. Maanmuotoa kuvaava malli.
DSM	Digital Surface Model. Digitaalinen pintamalli. Maanpintaa ja sen päällä olevia kohteita kuvaava malli.
DTM	Digital Terrain Model. Digitaalinen maastomalli. Maanpintaa kuvaava malli.
ekstrapolointi	Arvojoukon tihentäminen joukon ääriarvojen ulkopuolelle.
enimmäiskorkeus	Maximum Height. Korkeuden suhteen hajontaa sisältävän arvojoukon suurin korkeusarvo.
epäjatkuvuuspinta	Kahden yhtäkkisesti muuttuvan ominaisuuden tai arvon välinen rajapinta. Paikkatietomalleissa käytetään hajanaista pintarakennetta kuvailtaessa.
ETRS-TM35FIN	Suomessa vuodesta 2005 lähtien käytetty, eurooppalaiseen maaviite-järjestelmään ja poikittaiseen Mercatorin projektion projektiokaistaan 35 pohjautuva tasokoordinaatisto.
etupinta	Front Face. Monikulmion pinnan normaalin myötäinen pinta. Pinnan materiaaliominaisuudet, kuten tekstuuri, esitetään etupinnalla.

fluviaaliprosessi	Vedenalaisiin pintamateriaaleihin ja sedimentteihin kohdistuva eroosio, kuljetus ja kasautuminen veden virtauksen seurauksena.
Galileo	Eurooppalainen satelliittipaikannusjärjestelmä.
GeoTIFF	TIF-tiedostoformaattia käyttävä, nurkkapisteistään georeferoitu eli koordinaateiltaan määritelty kuvatiedosto. Koordinaattitieto on sisällytetty joko erilliseen tiedostoon tai TIF-tiedoston metadataan.
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System. Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
GNSS	Global Navigation Satellite System. Useasta satelliittipaikannusjärjestelmästä koostuva järjestelmäkokonaisuus.
GPRS	General Packet Radio Service. IP-osoiteavaruuteen perustuva langaton tiedonsiirtopalvelu.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltalainen satelliittipaikannusjärjestelmä.
gyroskooppi	Asennon mittaamiseen ja vakauttamiseen käytettävä laite.
hydrofoni	Vesimikrofoni. Vedenalaiseen ympäristöön kehitetty, ääniaaltoja rekisteröivä laite.
IMU	Inertial Measurement Unit. Inertiamittausyksikkö. Liiketilaa ja asentoa mittaava laite, joka sisältää kiihtyvyysanturin ja gyroskoopin.
INS	Inertial Navigation System. Inertianavigointijärjestelmä. IMU-yksiköstä ja laskentatietokoneesta koostuva vakautusjärjestelmä.

interpolointi	Arvojoukon tihentäminen yksittäisten arvojen väliin.
kaiku	Vedenalaisesta ääniaallosta havaittu vaste. Käytetään erityisesti kaikuluotaimen tuottamista ääniaalloista.
kaikujakso	Ping Cycle. Ääniaaltojen tuottamista ja havaitsemista määrityllä aikavälillä.
kaikupiste	Sounding. Akustisella mittausmenetelmällä tuotettu, koordinaateiltaan tunnettu mittaushavainto.
kaikuluotain	Echo Sounder. SONAR-teknologiaa hyödyntävä mittauslaite.
kallistus	Roll. X-akselin suhteen tapahtuva kulmamuuutos.
Kalman-suodin	Digitaalinen suodin, joka poistaa reaaliaikaisesti havaintoaineistosta aiempien mittaustulosten perusteella virheelliseksi arvioitua tietoa, kuten kohinaa.
kaksipuolinen pinta	Double Sided Face. Kaksipuolinen monikulmion pinta, mikä mahdollistaa pintaominaisuuksien, kuten tekstuurin, esittämisen monikulmion etu- ja takapinnalla.
karkea virhe	Gross Error. Arvojoukon keskimääräisestä vaihteluvälistä selkeästi poikkeava, virheellinen arvo.
kasipuu	Octree. Kolmiulotteisen arvojoukon jakaminen rekursiivisesti pienempiin suorakulmaisten särmiöiden muotoisiin alasoluihin, jotka sisältävät kahdeksan alasolua.
KD-puu	K-D Tree. K-Dimensional Tree. Kasipuusta kehittyneempi arvojoukon jakomenetelmä, joka laskee jokaisen tuotetun solun koon aineistoon optimoiden.
keskiarvotettu korkeus	Average Height. Korkeuden suhteen hajontaa sisältävän arvojoukon keskimääräinen korkeusarvo.

kliini	Veden suolaisuuden, tiheyden ja lämpötilan muutoksia kuvaava harppauskerros.
kohina	Noise. Mittauslaitteiston tuottama sähköinen häiriö.
kohinataso	Noise Level. Mittauslaitteiston sähköisen häiriön ominais määrä.
kohokuvapinnoitus	Bump Map. Kappaleen korkeussuhteita korostava, tekstuurin yhteydessä käytettävä kaksiulotteinen bittikarttamuotoinen varjostintyyppi, joka ei vaikuta kappaleen kolmiulotteiseen rakenteeseen.
kolmiointi	Kappaleen tai pinnan muodon mallintamista kolmioilla ja niistä rakentuvalla monikulmioverkolla.
kontrolli- ja kiinnityspiste	Control and Tie Point. Useamman mittausaineiston kohdentamisessa ja yhdistämisessä käytetty apupiste.
kriging-interpolointi	Tilastotieteessä, todennäköisyyslaskennassa ja geostatistikassa käytettävä monen muuttujan painotettu interpolointimenetelmä.
kuutio	Vedenalaisten kaikupisteiden näyterajauksessa käytettävä kolmiulotteinen muoto. Kuution sisältämiin pisteisiin sisältyvää tietoa vertaillaan tilastotieteellisin menetelmin vierekkäisten kuutioiden vastaaviin tietoihin esimerkiksi virheiden havaitsemiseksi ja vertailuanalyysien tuottamiseksi.
kärkipiste	Vertex, mon. Vertices. Koordinaateiltaan määritelty abstrakti geometrinen piste.
kääntyminen	Yaw. Z-akselin suhteen tapahtuva kulmamuuutos.
käärimisenpoisto	Unwrapping. XYZ-koordinaatistossa sijaitsevan kolmiulotteisen kappaleen pinnan geometrian sovitus kaksiulotteiseen UV-tekstuurikoordinaatistoon.

LAS	LASer File Format. Binäärimuotoinen tiedostoformaatti, jota käytetään pistepilvitiedon ja laserkeilainmittaukseen liittyvän tiedon tallentamiseen.
laajenemishävikki	Spreading Loss (SL). Ääniaallon leviämisen seurauksena tapahtuvaa signaalin heikkenemistä.
LiDAR	Light Detection And Ranging. Laservalon aallonpituuksiin perustuva optinen mittaustekniikka.
limnigrafi	Järvien ja sisävesien alueellisen vedenkorkeuden määrittämiseen käytetty mittalaite.
luiska	Maanpinnan rinne- ja rannan rakenne.
M-estimaattori	Tilastotieteellinen muuttujan arvon arviointimenetelmä.
MBES	Multibeam Echo Sounder. Monikanavainen kaikuluotain eli monikeilain. Kaikuluotain, joka käyttää vedenalaisen topografian mittauksessa useampaa rinnakkaista sädekeilaa.
mittauslinja	Mittausalueen mittauksessa käytämä väylä tai reitti, jonka mukaan mittausaineistoa tuotetaan.
monitieheijastus	GNSS-, laser- ja kaikuluotaustekniikassa esiintyvä ylimääräinen virheellinen havainto, joka muodostuu signaalin ylimääräisestä heijastumisesta mittauslaitetta ympäröivistä kohteista ja palautumisesta heijastuneena mittalaitteeseen.
MLS	Mobile Laser Scanning. Mobiililaserkeilaus. Liikkuvasta aluksesta toteutettava laserkeilaus.
monikulmio	Polygon. Vähintään kolmen, ei samalla suoralla sijaitsevan pisteen kautta kulkeva, yhtenäisen ja itseään leikkaamattoman murtoviivan sulkema tasoelementti.

monikulmioverkko	Polygonal Mesh. Useasta toisiinsa linkittyneistä ja toisiaan leikkaamattomista monikulmioista muodostuva verkkorakenne.
murtoviiva	Polyline. Yhtenäinen viivaelementti, joka koostuu yhdestä tai useammasta janasta ja janoja yhdistävistä pisteistä.
nelipuu	Quadtree. Kaksiulotteisen arvojoukon jakaminen rekursiivisesti pienempiin suorakulmaisiin alasoluihin, jotka sisältävät neljä alasolua.
NN	Normaalinolla. Suomessa käytetty yleinen vesistö- tai kanavakohtainen vedenpinnan korkeustasojärjestelmä, jonka nollakohdan referenssi on Helsingin Katajanokan vedenkorkeusasteikon nollakohta.
nousu	Pitch. Y-akselin suhteen tapahtuva kulmamuutos.
NTRIP	Network Transport of RTCM via Internet Protocol. GNSS-paikanmäärittämistiedon siirtämiseen käytetty, IP-osoiteavaruutta hyödyntävä tiedonsiirtoprotokolla.
näkymäkarttion leikkaus	View Frustum Culling. Menetelmä, joka mahdollistaa ruudulla näkyvän aineiston renderöinnin niin, että näkymän ulkopuolinen aineisto jätetään renderöimättä.
ohjaussuunta	Heading. Vesialuksen kulkusuuntaa kuvaava Z-akselin mukainen kulma-arvo.
ortografinen projektio	Orthographic Projection. Kappaleen kuvaus yhdensuuntaisilla säteillä kaksiulotteiselle tasolle. Esitetyn kappaleen mitta-kaava on koko tasolla yhdenmukainen.
ortoilmakuva	Ilma-aluksella stereokuvauksella maanpinnasta muodostettu valokuva, joka on jälkiprosessoitu fotogrammetristen virheiden poistomenetelmillä.

osaotos	Subsample. Arvojoukosta tilastollisesti valittujen yksittäisten arvojen muodostama ja koko arvojoukkoa kuvaava otanta.
pikseli	Tietokonegrafiikan elementti, joka muodostuu punaista, vihreää ja sinistä väriä kuvaavista bittiarvoista.
pinnan normaali	Surface Normal. Monikulmion kärkipisteiden muodostaman pinnan mukaista tangenttitasoa tai monikulmion pintaa kohtisuoraan vasten oleva suuntavektori.
pinnoittaminen	UV Mapping. Kaksiulotteisen tekstuurin sovittaminen kolmiulotteisessa avaruudessa sijaitsevan kappaleen pinnalle.
pinta	Face. Monikulmion muodon mukainen kaksiulotteinen topologinen taso. Geometrisessa avaruudessa tunnetaan myös tahkona.
pisteen normaali	Vertex Normal. Yksittäiselle solmu- tai kärkipisteelle interpolimalla vierekkäisten pintojen normaaleista muodostettu normaalivektori.
Poissonin pinnan uudelleenmuodostus	Poisson Surface Reconstruction. Pisteaineistojen mallintamiseen käytetty kolmiointimenetelmä.
POS	Position and Orientation System. Paikka- ja suuntajärjestelmä. GNSS- ja INS-järjestelmien muodostamasta kokonaisuudesta käytetty yhteisnimitys.
projektor	Äänilähde. Vedenalaiseen ympäristöön viitatessa tarkoittaa kaikuluotaimen osakomponenttia sekä mitä tahansa muuta vedenalaista äänilähdettä, kuten maanjäristystä.
rautalankamalli	Wireframe Model. Monikulmioverkon murtoviivoja korostava mallin esitysmuoto, jossa ei esitetä monikulmioiden pintatietoa.

renderöinti	Geometrialtaan ja materiaaliominaisuuksiltaan määritellyn kaksi- tai kolmiulotteisen aineiston tuottaminen kuva- tai videomuotoon tietokoneprosessoinnilla.
resoluutio	Erottelukyky. Pikseligrafiikassa kaksiulotteisen, matriisimuotoisen pikselikoordinaatiston koko. Myös mittauslaitteella tuotettavan pisteaineiston tiheys ja eroteltavuus.
RGB-värjäys	Väri-informaation lisääminen pistepilven pisteille.
RKY	Rakennetut Kulttuuriympäristöt. Museoviraston määrittelemä merkintä yhteiskunnallisesti ja kulttuurisesti merkittävistä rakennetuista ympäristöistä.
robusti tilastotiede	Tilastotieteen osa-alue, jota käytetään arvojoukon normaali-jakaumasta poikkeavien arvojen vaikutusten arviointiin. Robustiset menetelmät soveltuvat hyvin esimerkiksi kahden keskihajonnaltaan poikkeavan normaalijakauman arviointiin. Robustisilla menetelmillä arvioidaan muun muassa sijaintiin, mittakaavaan ja regressioihin liittyviä muuttujia.
ROV	Remote Operated Vehicle. Kauko-ohjattava alus.
RTK	Real Time Kinematic. Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus, jossa käytetään kahta GNSS-vastaanotinta tarkemman sijaintitiedon tuottamiseksi. Toinen vastaanottimista on kiinteänä tukiasemana.
ruudukko	Grid. Ruutumalleissa käytettävä, riveihin ja sarakkeisiin jaettu, säännöllinen matriisimuotoinen, pikseleillä kuvattu tasorakenne.
ruutukoko	Ruudukon solun sivun pituuden ja pikselin suhde. Määrittää, kuinka laajan neliön muotoisen alueen yksi pikseli kattaa. Ruutukoko määrittää ruutumallin resoluution.

SBES	Single Beam Echo Sounder. Yksikanavainen kaikuluotain. Kaikuluotain, joka käyttää vedenalaisen topografian mittauksessa yksittäistä sädekeilaa.
sedimentti	Luonnollisten prosessien seurauksena kerrostunut maa-aines.
signaali-kohinasuhde	Signal-to-Noise Ratio. Suhdearvo, jota käytetään laitteiston tuottaman kohinan suodattamiseen pois mittausaineistosta.
signaalinmuunnin	Transducer. Laite, joka muuntaa signaalin sähköiseen muotoon ja päinvastoin. Kaikuluotaimessa koostuu projektorista ja hydrofonista, ja muunnettavat signaalit ovat ääniaaltoja.
siirtohävikki	Transmission Loss (TL). Yhteisnimitys laajenemis- ja absorptiohävikille.
silottaminen	Smoothing. Monikulmioiden tai solmupisteiden normaalivektoreiden tasoitusmenetelmä.
sivu- ja takakeilat	Mittauslaitteen tuottaman sädekeilan sivuille ja taakse syntyvät virheelliset keilat.
skalaarikenttä	Scalar Field. Arvojoukon jakautumista vektoriavaruudessa kuvaava matemaattinen funktio tai fysikaalinen suure.
solmupiste	Node. Nollaulotteinen, koordinaateiltaan määritelty abstrakti topologinen piste.
SONAR	Sound Navigation And Ranging. Ääniaaltoihin perustuva eli akustinen vedenalaisten kohteiden havaitsemiseen käytetty mittausteknologia.
SVP	Sound Velocity Profile. Vedenalaisessa mittausprosessissa mitattava ja käytettävä äänennopeusprofiili.

symbolinen malli	Symbolic Model. Matemaattisesti tietokoneella muodostettu binäärimuotoinen maantieteellinen esitys.
särmä	Edge. Kaksi solmupistettä yhdistävä yksiulotteinen topologinen viivaelementti.
takaisinsironta	Backscattering. Kaikuluotaimeen takaisin heijastuneista ääniaalloista käytetty nimitys.
takaisinsironnan vahvuus	Backscattering Strength. Akustisen kaikuluotaimen mittaus-tarkkuutta kuvaava luku, joka on sidonnainen sedimenttien ja muiden vedenalaisten materiaalien heijastusominaisuuksiin.
takapinta	Back Face. Monikulmion pinnan normaalin vastainen pinta, jolla pinnan ominaisuuksia, kuten tekstuuria, ei esitetä.
teksturointi	Texture Mapping. Monikulmion pinnan värjäys väriarvolla tai kaksiulotteisella bittikarttakuvalla eli tekstuurilla.
TIN	Triangulated Irregular Network. Epäsäännöllinen kolmioverkko.
TLS	Terrestrial Laser Scanning. Maalaserkeilaus. Kiinteältä maanpinnalla sijaitsevalta asemapisteeltä toteutettava laserkeilaus.
topografia	Maanpinnan muotojen ja ominaisuuksien kuvaus.
topologia	Kappaleen muodon ja verkostorakenteen matemaattinen kuvaus.
UAS	Unmanned Aerial Scanning. Miehitämätön ilmakeilaus. Miehitättömästä ilma-aluksesta käsin toteutettu laserkeilaus.

UAV	Unmanned Aerial Vehicle. Miehittämätön ilma-alus. Radio-ohjattava, etäkäyttöinen lentävä laite.
UV-koordinaatisto	Tekstuurin käyttämä erilliskoordinaatisto, johon kolmiulotteisen kappaleen geometria sovitetaan erillisen projektiotason avulla.
varjostin	Shader. Tekstuurin ominaisuuksia muokkaava pinnoite.
Voronoin kaavio	Voronoi Diagram. Epäsäännöllisesti jakautuneiden pisteiden ympärille muodostettu solurakenne.
VRS	Virtual Reference Station. Virtuaalinen tukiasema. Interpoloimalla GNSS-vastaanottimen läheisyyteen laskettu, fyysisesti olematon, virtuaalinen tukiasema.
vähimmäiskorkeus	Minimum Height. Korkeuden suhteen hajontaa sisältävän arvojoukon pienin korkeusarvo.

1 Johdanto

Insinööriyössä tutkitaan vedenalaisen topografian ja vedenpäällisten kohteiden mallinnusmenetelmiä. Insinööriyön toimeksiantajana on suomalainen Meritaito Oy, joka on vedenalaisiin kartoitusprosesseihin, vedenalaiseen rakentamiseen sekä merenkulkuun erikoistunut yritys. Yritys luovutti insinööriyötä varten pistepilvimuotoista mittausaineistoa, joka on jaettu vedenalaiseen ja vedenpäälliseen osaan.

Vedenalaisten osien mittaus toteutettiin akustisella mittausmenetelmällä. Vedenpäällisten pienkohteiden mittaus toteutettiin laserkeilaimella mittausaluksesta käsin. Koska mittaustekniikoista johtuvat virheet vaikuttavat aineiston jatkokäyttöön ja työssä tutkittaviin menetelmiin, käsitellään tekniikoihin liittyvät asiakokonaisuudet työssä tarpeellisin osin.

Tavoitteena insinööriyössä on tutkia yrityksen työprosesseihin soveltuvia vedenalaisen ja -päällisen aineiston mallinnusmenetelmiä. Prioriteetteina työssä tutkituille menetelmille ovat koordinaattien säilyvyys sekä tutkittavien menetelmien automaattisuus, helppokäyttöisyys, nopeus ja ymmärrettävyys.

Aineiston mallintamisen tavoitteena on parantaa mittausaineiston hahmotettavuutta ja visuaalisuutta. Pisteaineiston esittäminen sellaisenaan mallinnusohjelmissa on ongelmallista, koska pisteiden muodostama pinta ei ole rakenteellisesti eheä ja vaikeuttaa läpinäkyvyytensä vuoksi visuaalista tulkintaa erityisesti sellaisissa aineiston kohdissa, joissa pistemuotoisia kappaleita sijaitsee toistensa edessä ja takana. Visuaalisuuden parantamisen lisäksi muita tavoitteita mallintamiselle on aineiston siirrettävyyden parantaminen eri tietokonepohjaisten mallinnusohjelmien välillä ja yrityksen jatkokehityshankkeiden pohjustaminen.

2 Tutkimuskohde

2.1 Taipaleen kanava

Taipaleen kanava on Liikenneviraston ylläpitämä sulkukanava, joka sijaitsee Varkaudessa, Itä-Suomessa (kuva 1). Kanava kuuluu Vuoksen vesistön kanaviin, ja se yhdis-

tää Unnukan ja Haukiveden toisiinsa. Unnukka muodostaa kanavan pohjoispuolella sijaitsevan ylävesistön, kun taas Haukivesi muodostaa vastaavasti kanavan eteläpuolella sijaitsevan alavesistön. [1.] Meritaito Oy toteutti Taipaleen kanavan mittauksen heinäkuussa 2015 Liikenneviraston sisävesiväyläyksikön toimeksiannosta.



Kuva 1. Taipaleen kanava Haukiveden alavesistön suunnalta kuvattuna [2].

Liikennevirasto ylläpitää Suomen sisävesistön 31:tä sulkukanavaa, jotka sijaitsevat Vuoksen, Kymijoen ja Kokemäenjoen vesistöissä. Lisäksi virasto ylläpitää Saimaan kanavaa. [3.]

2.1.1 Historia

Alkuperäinen Taipaleen rakennettiin luonnonkivilohkareista, ja se valmistui vuonna 1840. Kanava on sittemmin raunioitunut, ja se tunnetaan nykyään museokanavana (kuva 2). Vanha kanava sijaitsee nykyisin käytössä olevan kanavan itäpuolella.

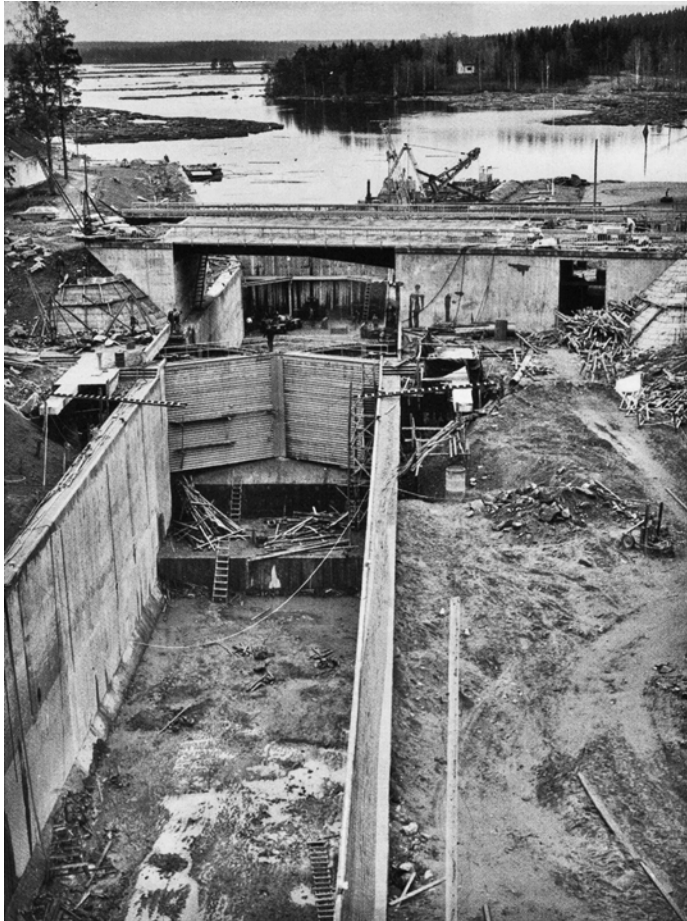


Kuva 2. Taipaleen vanha museokanava on raunioitunut ja kaisloittunut, eikä sitä käytetä enää kanavatoimintoihin [4].

Nykyisin käytössä olevan kanavan rakentaminen ajoittuu vuosille 1867–1871. Vuosien 1962–1967 aikana kanava kunnostettiin syväväyläkanavaksi. [5; 6, s. 93–95.] Kanava-kokonaisuus kuuluu Museoviraston luokittelussa valtakunnallisesti merkittäviin rakennettuihin kulttuuriympäristöihin (RKY, Rakennetut Kulttuuriympäristöt) merkinnällä "Taipaleen kanavat" [7].

2.1.2 Teknisiä tietoja

Käytössä olevan Taipaleen kanavan seinät koostuvat teräsbetonista. Kanavan sulkuportit ovat teräsrakenteisia sektoriporteja, joiden välissä sijaitsee sulkukammio. Sulun pohjalla sijaitsee veden liikettä tasoittava betonitasanne (kuva 3). Yläportin takana sijaitsee vedenalainen välitaso, joka vaimentaa täyttövaiheessa sulkuun syöksyviä vesimassoja.



Kuva 3. Taipaleen syväväyläkanavan rakentamista. Kuvassa kanavan rakenteet, kuten porrasmainen betoninen välitaso ja seinät, erottuvat hyvin [6, s. 94].

Kanavan vedenkorkeus mitataan kanavarakenteisiin asennetuilla limnigrafeilla, jotka sijaitsevat ylä- ja alaveden tasossa sekä sulkukammiossa [8, s. 71]. Taipaleen kanavan vedenkorkeuden alavertailutasot (NN + m) ovat seuraavat [9, s. 3.]:

- Alakanava: 75,10 metriä
- Yläkanava: 81,10 metriä

Kanavan vedenkorkeuden ylävertailutasot (NN + m) ovat

- Alakanava: 76,60 metriä
- Yläkanava: 81,20 metriä

2.2 Kanava mittauskohteena

2.2.1 Mittauksen toteuttaja

Meritaito Oy yhtiöitettiin Merenkululaitoksesta vuoden 2010 alussa. Merenkululaitos oli toiminnassa vuodesta 1918 lähtien [10]. Meritaito Oy:n erityisosaamista ovat merenkulun viitta- ja poijutuotanto, öljyntorjuntalaitteiden tuotanto sekä vedenalaiset rakennetutkimukset ja suunnittelutyöt.

Yritys on yksi Pohjois-Euroopan suurimmista merenmittausyrityksistä, ja se tuottaa mittausaineistoja ja niistä tehtäviä arviointeja eri asiakastarpeisiin soveltuviksi. Yrityksen tuottamien mittausaineistojen mittakaava vaihtelee suurista vedenalaisista kokonaisuuksista pieniin paikallisiin mittauskohteisiin. Tyypillisiä mittauskohteita ovat Suomen sisävesistön kohteet, kuten kanavat, padot, järvet ja joet sekä rannikkovesistöt. [11; 12.]

Yritys tuottaa mittauskohteista vedenalaista kaikupisteaineistoa, vedenpäällistä laserkeilausaineistoa, kaikuluotaustekniikkaan perustuvaa kuva-aineistoa sekä akustisin menetelmin toteutettavia vedenalaisten pohjasedimenttien maalajiluokituksia. Tuotettavaan aineistoon lukeutuu muun muassa syvyystiedot, pohjatopografiatieto sekä kunto-tarkastus olemassa oleville rakenteille. Yritys toteuttaa vedenalaisiin kohteisiin liittyviä lisätutkimuksia ja huoltosuunnitelmia asiakastarpeiden mukaan. Lisäksi yritys toteuttaa hylky- ja lohkekartoituksia. [13; 14.]

2.2.2 Tuotettu mittausaineisto

Taipaleen kanava valittiin insinööritoiminnassa tutkimuskohteeksi Meritaito Oy:n pyynnöstä.

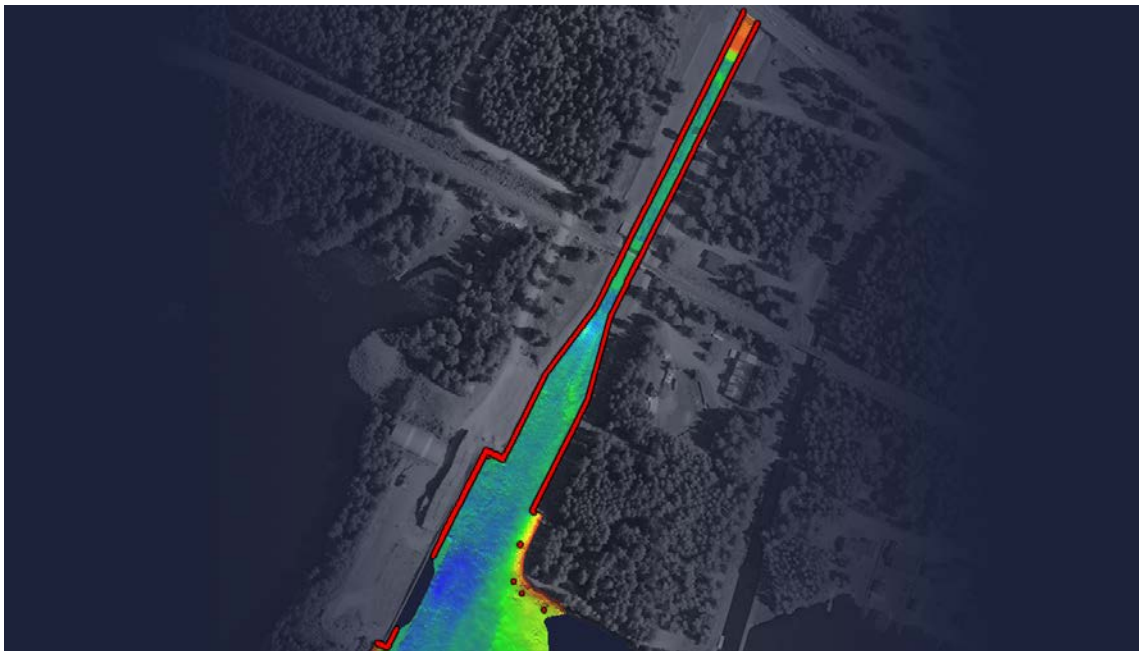
Mittauksessa mitattiin kanavan vesirajan ala- ja yläpuoliset rakenteet ylä- ja alasulun osalta kokonaisuudessaan (kuva 4). Vedenalaiset rakenteet ja pohja on mitattu mittausalukseen kiinnitetyllä monikanavaisella kaikuluotaimella. Veden yläpuoliset rakenteet on mitattu vastaavasti alukseen kiinnitetyllä laserkeilaimella. Yritys luovutti insinööritoimintaan tutkimuskäyttöön edellä mainittua mittauksista koskevan aineiston XYZ-pistepilvimuodossa jaettuna seuraaviin osiin:

- kanavan pohjatopografia

- kanavan vedenalaiset seinärakenteet
- kanavan vedenpäälliset osat

Aineiston osiin kohdistettiin erilliset tutkimisprosessit, koska ne poikkesivat rakenteellisesti, geometrisesti ja tuotetun pistemäärän suhteen toisistaan.

Aineisto oli orientoitu ETRS-TM35FIN-tasokoordinaatistoon. Korkeustieto on suhteutettu vedenpinnan tason mukaan niin, että kanavan alaosa on käytetty syvyydestä NN + 75,10 m (NN, Normaalinnolla), ja yläosassa tasoa NN + 81,10 metriä. Vedenkorkeuden eli vedenpinnan nollatason mitta-asteikkona käytettiin alavesistön osalta ala-asteikkoa Haukivesi, Oravi. ja ylävesistön osalta yläasteikkoa Unnukka, Taipale. Kanavan sulkukammion syvyysarvot on mittauksessa sidottu alavesistön limnigrafian asteikkoon. [15; 16, s. 1/36.]



Kuva 4. Taipaleen kanavan mittaus vedenalaisten rakenteiden osalta. Punaisella on merkitty mitattu vedenalainen seinäaineisto, ja korkeusvärityksellä vedenalainen kanavan pohja-aineisto. Taustakarttana on käytetty Maanmittauslaitoksen tuottamaa ortoilmakuvaa alueesta. (Kuva: Pekka Helenius)

2.2.3 Mittauksen tarkoitus

Kanavasta tuotettu mittausaineisto tukee alueen infrastruktuurin suunnittelua, rakenteissa tapahtuvien muutosten havainnointia sekä erityyppisten vedenalaisten kohteiden

paikantamista. Vedenalaisen mittausaineiston perusteella voidaan havainnoida vedenalaisia kohteita tarkasti ja sitoa ne haluttuun koordinaatistoon, mikä auttaa paikkatietoanalyysien, myöhempien maastomittausten ja rakennesuunnitteluun liittyvien työprosessien toteuttamisessa. Mittausaineistosta voidaan tuottaa kuvia, videoita ja malleja käyttötarpeesta riippuen.

Laserkeilauksen hyödyntäminen osana vedenalaista mittausprosessia tukee myöhempiä suunnittelutyötä, koska vedenpäällistä mittausaineistoa voidaan käyttää vertailukohtana vedenalaisten kohteiden sijaintia ja etäisyyksiä hahmottaessa. Vedenalaisen monikeilainmittauksen tukena voidaan tarvittaessa käyttää myös sukeltajan suorittamaa rakenteiden kuntoarviointia tai vedenalaisella kauko-ohjauskalustolla (ROV, Remote Operated Vehicle) suoritettua kohteiden kuvausta. [17, s. 21, 27–28.]

3 Käytetyt mittaustekniikat

3.1 Kaikuluotaus

Taipaleen kanavan vedenalaisten rakenteiden mittaus toteutettiin akustisella kaikuluotaustekniikalla, joka tunnetaan nimellä SONAR (Sound Navigation And Ranging). Sonar-laitteet eli kaikuluotaimet (Echo Sounders) ovat akustisia ja hyödyntävät toiminnassaan ääniaaltojen käyttäytymistä vedessä. Laitteita on kahdentyypisiä, passiivisia ja aktiivisia.

Passiiviset sonar-laitteet ovat kuuntelevia laitteita, jotka tallentavat vedenalaisista kohteista heijastuvia ääniaaltoja. Tämän tyyppisiä laitteita voidaan käyttää seismisten tapahtumien, laivojen, sukellusveneiden, merieläinten ja kaikkien muidenkin ääntä lähettävien kohteiden havainnointiin. Passiivisia sonar-laitteita ei käytetä vedenalaisen pohja-aineiston kartoittamisessa.

Aktiiviset sonar-laitteet tuottavat ääniaaltoja hallitusti valituilla taajuuksilla. Laitteet kuuntelevat vedenalaisista kohteista heijastuvia ääniaaltoja ja pystyvät muodostamaan niistä paikkaan sidottua informaatiota. Merensyvyyttä, pohjatopografiaa ja vedenalaisia rakenteita mittaavat sonar-laitteet ovat aktiivisia.

Kaikuluotain mittaa syvyyttä luomalla lyhyitä ääni-impulsseja ja kuuntelemalla niiden heijastumista merenpohjasta takaisin luotaimeen. Vedenalaisen kohteen etäisyys laitteesta noudattaa kaavaa

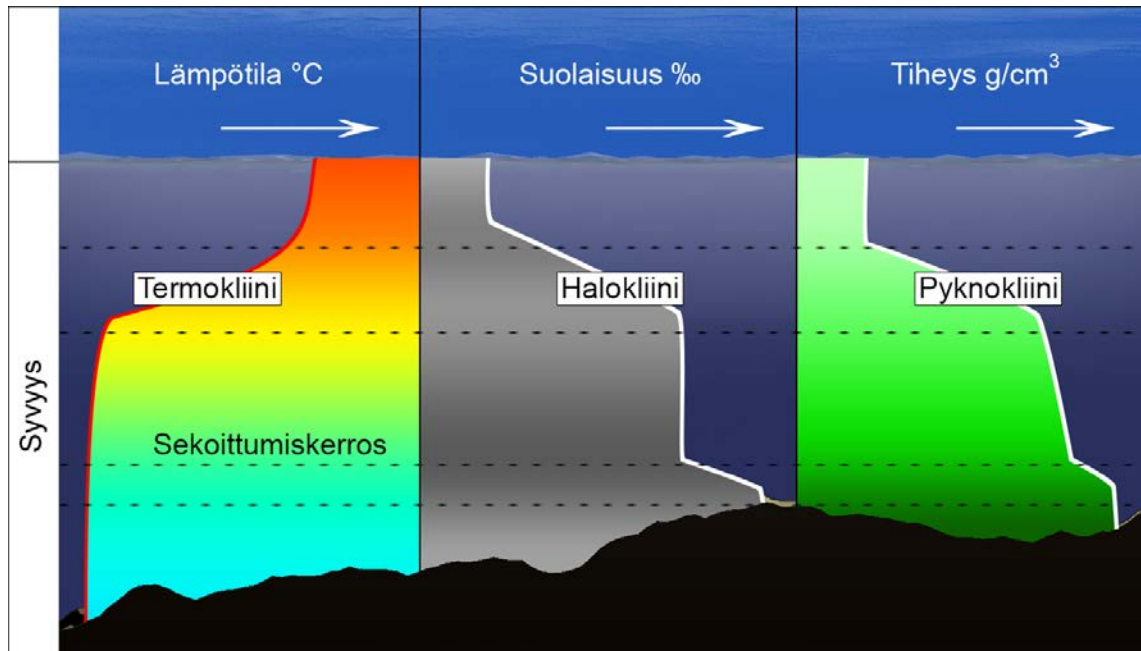
$$s = \frac{vt}{2} \quad (1)$$

, jossa s on vedenalaisen kohteen etäisyys (matka), v on äänennopeus vesipatsaassa ja t on ääniaallon kokonaiskulku-aika vedessä. [18, s. 2-3–2-4.]

3.1.1 Ääniaallot vedessä

Ääniaallot ovat väliaineessa etenevää värähtelevää aaltoliikettä, ja niitä kuvaavat aaltoliikettä kuvaavat fysiikan lait. Ääniaalto määritetään aallonpituuden, amplitudin, taajuuden ja nopeuden mukaan. Amplitudi (a) kuvaa värähdysliikkeen laajuutta, aallonpituus (λ) vastaavien kohtien etäisyyttä peräkkäisissä aalloissa, taajuus (f) aaltojen lukumäärä aikayksikköä kohden ja nopeus (s) aaltoliikkeen etenemisnopeutta väliaineessa. [19, s. 3–4.]

Aktiivisen sonar-laitteen tuottaman ääniaallon väliaineena on vesi, joka on kerrostunut vesipatjaksi. Kerroksellinen rakenne johtuu veden ominaisuuksissa tapahtuvista vaihte-
luista. Kerrosrakennetta kuvataan harppauskerroksilla eli kliineillä (kuva 5).



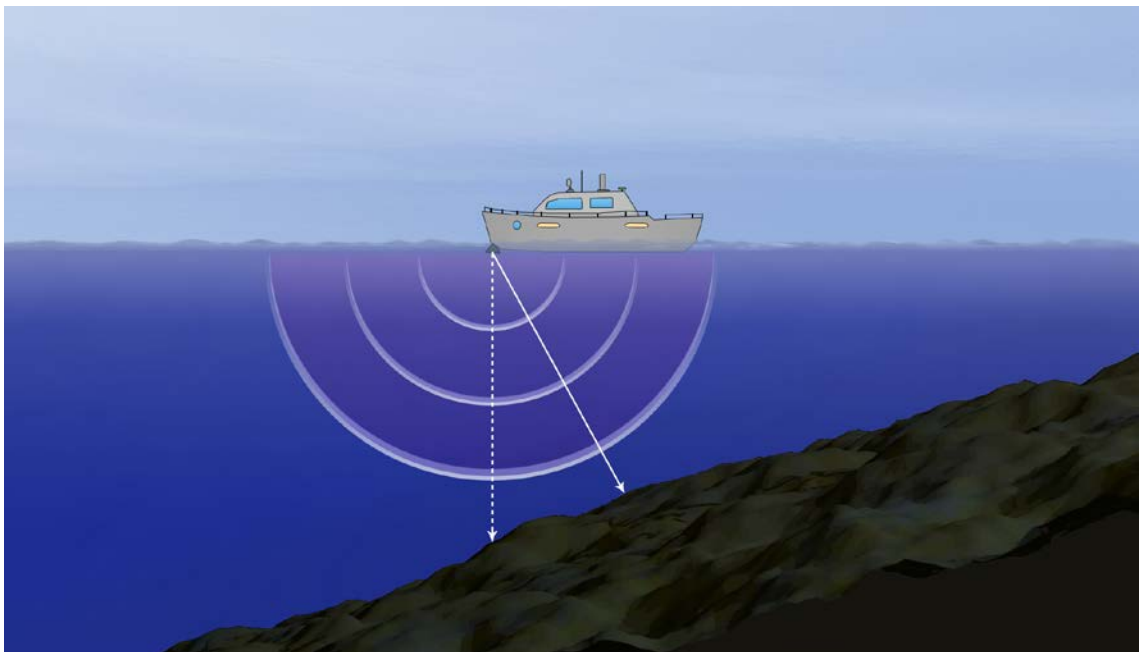
Kuva 5. Vesipatjan kerrosrakennetta kuvataan kliineillä eli harppauskerroksilla. Kerrostuneisuutta esiintyy sekä järvi- että merivedessä. Tuulen synnyttämä turbulenttiset eli pyörteiset virtaukset sekoittavat ja tasoittavat järvien kerrostuneisuutta. Matalissa vesissä kerrostumista ei pääse tuulen sekoitusvaikutuksen takia syntymään. (Kuva: Pekka Helenius)

Veden liike aiheuttaa muutoksia veden kerroksellisuuteen. Pintavesissä liike on pääasiassa tuulen aiheuttamaa pinta-aallokkoa, syvemmillä vesialueilla pystykierron eli pääasiassa lämpötila- ja suolaisuuserojen aiheuttamia sisäisiä aaltoja. Merissä, järvissä, kanavissa ja satamissa esiintyy lisäksi vesialtaan seisovia aaltoja eli seiche-aaltoja. Vedenpinnalla esiintyy värinää eli kapillaariaallokkoa. Vuorovesi-ilmiö ei pienissä vesistöissä vaikuta merkittävästi veden korkeuteen, mutta suurempia vesistöjä mitattaessa sen vaikutus on huomioitava. [8, s. 69–70, 82–83, 85–86.]

Veteen kaikuluotaimella tuotettavan äänen nopeus riippuu kerroksissa tapahtuvista muutoksista, jotka aiheuttavat refraktiota eli taittumista äänen kulussa. Ääniaaltojen refraktiomuutosten vuoksi aaltojen kulkua mitataan kohdealueelta ennen mittausta ja sen aikana. Mittausten perusteella tuotetaan mittaustarkkuutta parantava äänennopeusprofiili (SVP, Sound Velocity Profile), joka välitetään kaikuluotainlaitteistolle. Lämpötilassa tapahtuvat muutokset vaikuttavat äänennopeuteen yksittäisistä tekijöistä eniten. [20, s. 9–11.] Kaikuluotaimesta vedenalaiseen kohteeseen kulkeutuvan ja heijastuvan ääniaaltoimpulssin kulkuajan yhdistäminen vesistön tunnettuun äänennopeusprofiiliin antaa paikkaan sidottua tietoa kohteen ja laitteen keskinäisestä etäisyydestä.

3.1.2 Ääniaaltojen hävikki

Veteen tuotettu ääniaalto laajenee pallomaisesti lähteestään ja kulkee tasaisesti kaikkiin suuntiin (kuva 6). Aalto heikkenee laajetessaan, mitä kutsutaan laajenemishävikiksi (SL, Spreading Loss). Ääniaalto myös absorboituu eli imeytyy kohteisiinsa, mitä kutsutaan absorptiohävikiksi (AL, Absorption Loss). Laajenemishävikkiin vaikuttaa keskeisesti vesipatsaan ominaisuudet ja pohjanmuodot, kun taas absorptiohävikkiin vaikuttavat pohjasedimenttien laatutekijät sekä kaikuluotaimen tuottamien ääniaaltojen taajuus: ääniaallot imeytyvät herkemmin pehmeisiin materiaaleihin, kuten hiekkaan ja lietteeseen, kuin kiviin, metalliesineisiin tai muihin koviin materiaaleihin. Matalamman taajuuden ääniaallot imeytyvät herkemmin kuin korkean taajuuden aallot. Osa imeytymättömistä ääniaalloista heijastuu takaisin ja leviää ympäristöön, minkä takia vain murto-osa kaikuluotaimen projektorin muodostamista ääniaalloista heijastuu lopulta takaisin kaikuluotaimeen. Laajenemishävikki ja absorptiohävikki muodostavat siirtohävikkinä (TL, Transmission Loss) tunnetun kokonaisuuden. Siirtohävikin määrä on suoraan verrannollinen ääniaallon kulkemismatkaan: mitä kauemmas ääniaalto kulkeutuu, sen enemmän muodostuu hävikkiä ja aalto heikkenee. [18, s. 2-4–2-5; 20, s. 14.]



Kuva 6. Kaikuluotaimen lähettämät ääniaallot levittäytyvät pallomaisesti lähteestään tasaisesti kaikkiin suuntiin veden alla. Mitä kauemmas ääniaallot levittäytyvät vesipatjassa, sen heikompi on kaikuluotaimen niistä havaitsema vaste. (Kuva: Pekka Helenius)

3.1.3 Kaikuluotaimen rakenne

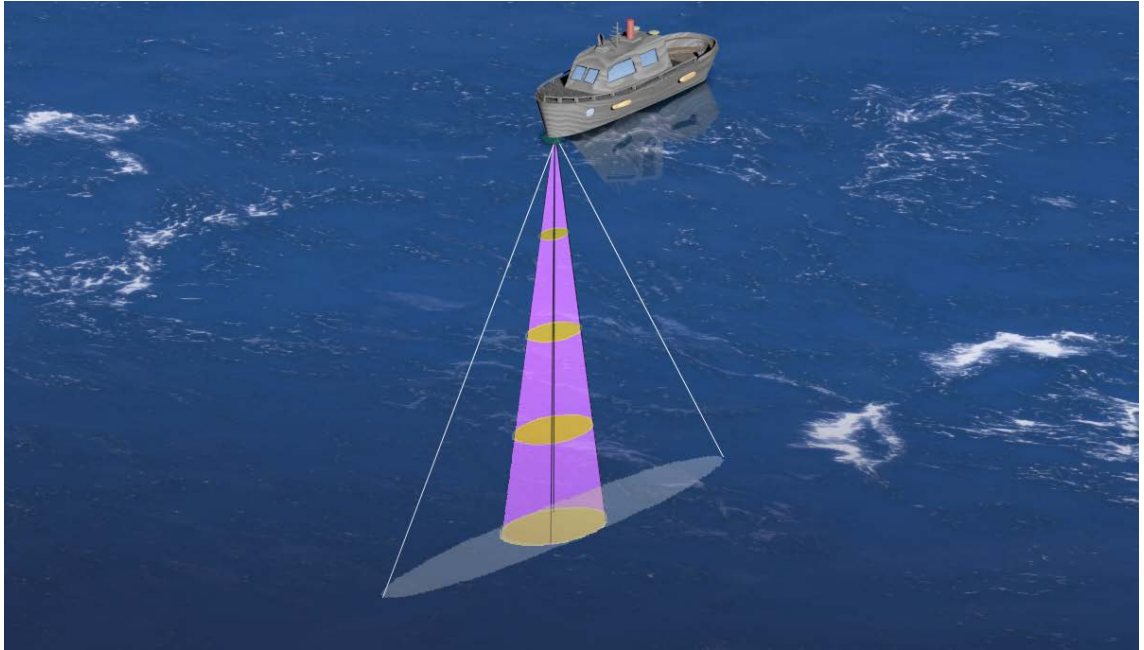
Ääniaaltoja tuottava laite tai menetelmä on projektori. Kaikuluotaimessa se on keraaminen komponentti, jonka toiminnassa keskeistä on sen rakenteen koon muuttuminen tuotetun sähköjännitteen vaikutuksesta. Sähköjännite saa projektorin värähtelemään, minkä seurauksena veden alle muodostuu paineaalto. Kaikuluotaimen projektorin toimintaperiaate on yhdenmukainen tavallisen huonekaiuttimen kanssa, jonka toiminnassa väliaineena veden sijaan on ilma. Muita vedenalaisia projektoreita ovat räjähteet, sähköpurkaukset ja seismisissä mittauksissa käytettävä paineilma.

Vedenalaiseen mittaukseen käytettävät kaikuluotaimet edellyttävät, että tuotetut ääniaallot ovat säännöllisiä, tarkkoja, toistettavia ja hallittavia. Äänen tuottamisessa haasteita ovat äänen amplitudin, taajuuden ja keston hallittavuus peräkkäisten kaikujen välillä. [18, s. 2-4.]

Kaikuluotaimeen takaisin heijastuneista ääniaalloista käytetään yhteisnimitystä takaisinsirona (Backscattering). Jokaisella pohjan materiaalilla on takaisinsironnan määrää kuvaava vahvuusluku (Backscattering Strength), jota käytetään arvioidessa akustisen kaikuluotainmittauksen tarkkuutta. Kaikuluotain havaitsee ääniaaltojen kulussa tapahtuvan siirtohävikin sisäänrakennetulla hydrofonilla eli vesimikrofonilla, joka muuttaa rekisteröidyt äänisignaalit sähköiseen muotoon. Hydrofoni ja projektori muodostavat yhdessä kaikuluotaimen anturi- eli signaalinmuunninlaitteiston (Transducer), joka muuntaa sähköjännitteen ääniaalloiksi ja päinvastoin. [18, s. 2-5.]

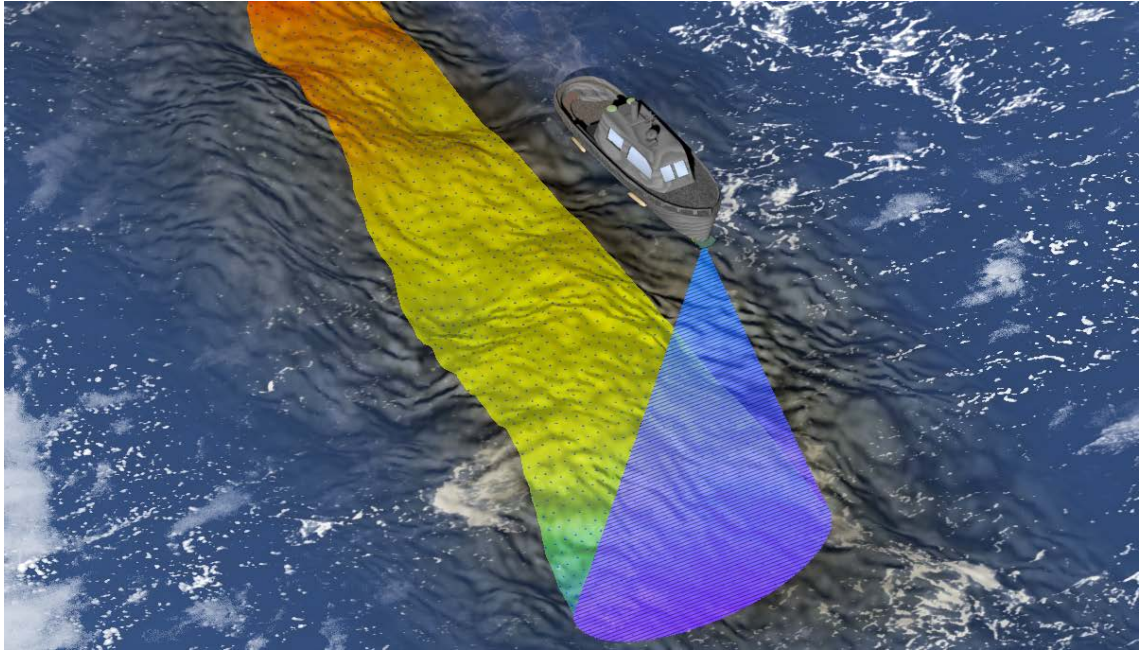
3.2 Yksikanavainen kaikuluotain

Yksikanavainen kaikuluotain (SBES, Single Beam Echo Sounder) edustaa varhaisinta ja eniten käytettyä kaikuluotaintyyppiä (kuva 7). Kaikuluotaimen mittaamat syvyysarvot sidotaan sijaintitietoon, minkä seurauksena voidaan muodostaa kolmiulotteinen kartta vesistön pohjanmuodoista. [18, s. 2-6.] Kaikuluotainta käytetään mittausaluksen liikkuessa, ja sen toimintaa hallitaan aluksessa olevalla hallinnointijärjestelmällä [18, s. 2-7].



Kuva 7. Yksikanavainen kaikuluotain. Kaikuluotaimen tuottama keilaussäde levittäytyy tasaisessa kulmassa alaspäin. Mitä syvemmälle säde ulottuu, sen laajemmalle alueelle se levittäytyy. Keltaiset alueet havainnollistavat säteen pinta-alallista levittäytymistä syvyyden ja säteen kulman suhteen. Valkoinen aluerajaus kuvastaa hydrofonin kuuntelemaa aluetta. [18, s. 2-12; 20, s. 12.] (Kuva: Pekka Helenius)

Kaikuluotain mittaa ja rekisteröi pohjan syvyysarvoja jatkuvalla syklillä aluksen kulkusuunnan mukaisesti (kuva 8). Peräkkäiset mittaushavainnot muodostavat kaikujakson (Ping Cycle), jonka tiheyttä säädellään aluksen hallinnointijärjestelmällä. Vastaanotetut äänihavainnot vahvistetaan vastaanottojärjestelmässä, joka rekisteröi niiden havainnointiajan ja laskee käytettävissä olevan tiedon perusteella yksittäisen havainnon sijainnin käytetyssä koordinaatistossa. [18, s. 2-8–2-9.]



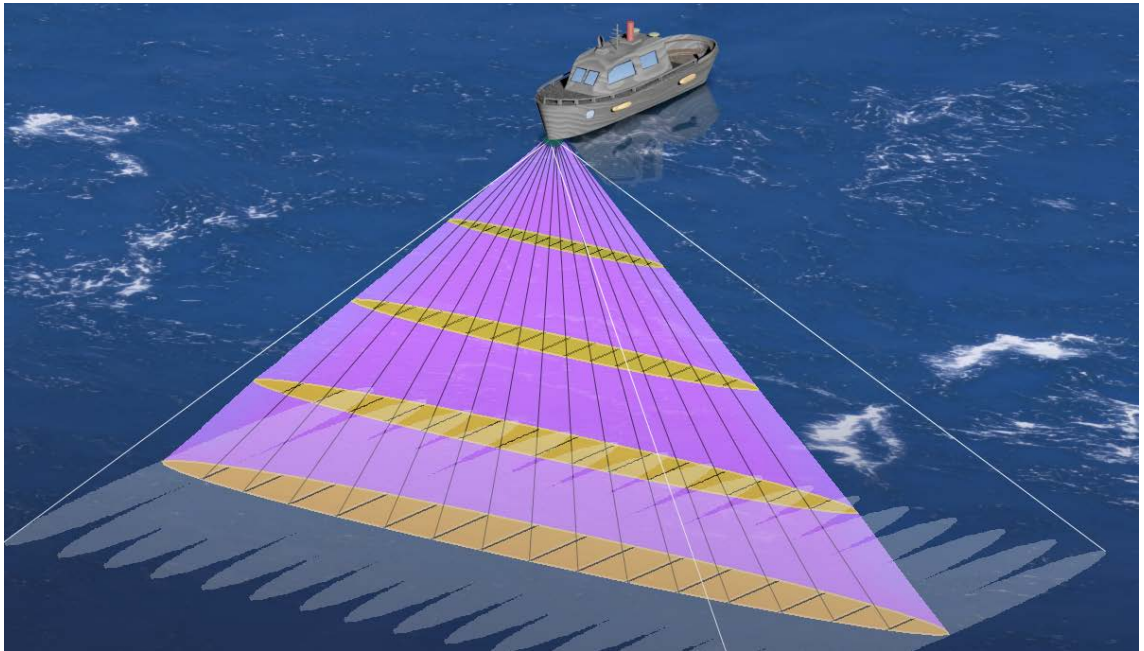
Kuva 8. Mittausaluksen kaikuluotain tuottaa pistemuotoista mittausaineistoa vedenalaisesta pohjatopografiasta rekisteröityjen syvyysarvojen mukaan aluksen kulkusuunnan myötäisesti. (Kuva: Pekka Helenius)

Yksikanavainen kaikuluotain on rakenteellisesti yksinkertainen ja edullinen, mutta se ei sovellu laajoihin vedenalaisiin kartoitusprojekteihin. Yksikanavaisella kaikuluotaimella mittaus ei ole ajallisesti tehokasta, koska sillä pystytään tuottamaan vain yksi syvyysmittaushavainto kerrallaan. Vierekkäisten syvyyspistetietojen mittaaminen samanaikaisesti ei ole mahdollista, ja niiden mittaaminen vie näin ollen aikaa. Luotaimessa voidaan käyttää suurempaa luotaimen säteen kulma-arvoa, mutta se heikentää mitatun aineiston horisontaalista resoluutiota ja kasvattaa mittausaineiston vääristymiä ennen kaikkea säteen ulkolaidoilla. Vääristymien vuoksi kulman kasvattaminen ei sovellu tarkkuutta edellyttäviin mittauksiin. Yksikanavaisen kaikuluotaimen käyttö rajautuu nykyään lähinnä monikeilaintekniikalla mitatun aineiston täydennyksiin. [18, s. 2-9, 2-12; 20, s. 8.]

3.3 Monikanavainen kaikuluotain eli monikeilain

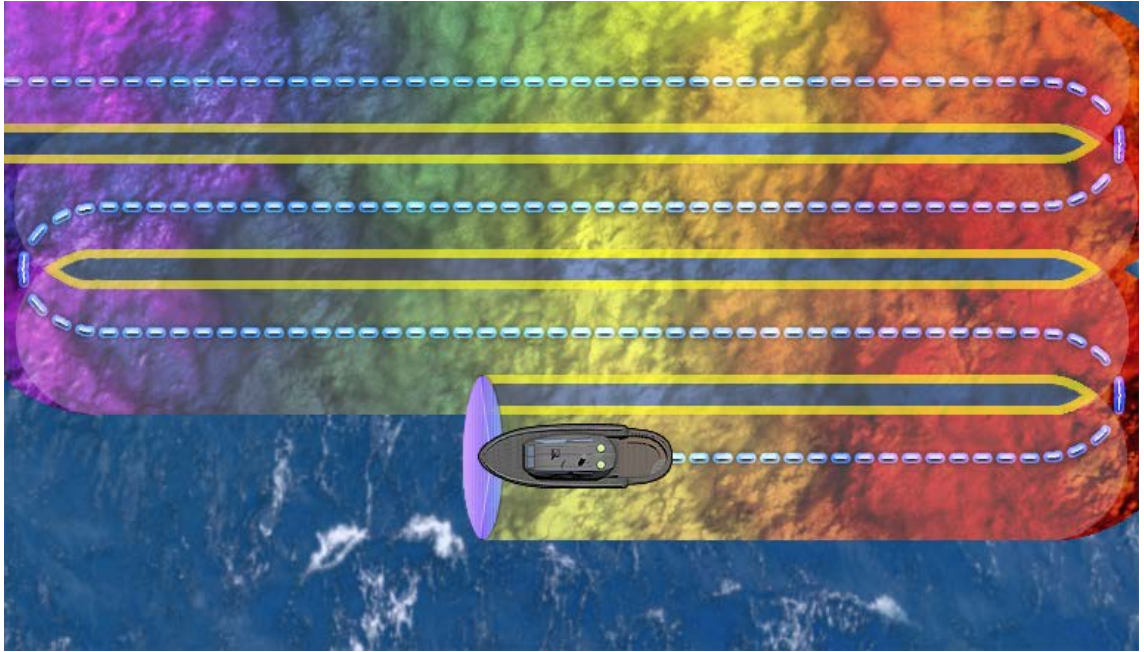
Yksikanavaisen kaikuluotaimen toimintasäteen rajoittuneisuuden kiertämiseen on kehitetty monikanavainen kaikuluotain eli monikeilain (MBES, Multibeam Echo Sounder). Monikeilain käyttää mitaushavaintojen tekoon useampaa sädekeilaa, jotka projisoidaan toistensa viereen siten, että keilattava alue on yksikanavaisella kaikuluotaimella

tuotettua aluetta leveämpi (kuva 9). Monikeilaimella säilytetään aineiston korkea horisontaalinen resoluutio, ja leveämmän keilausalueen ansiosta mittausprosessi nopeutuu. Monikeilaintekniikan etujen vuoksi sitä suositetaan vedenalaisissa kartoitustehtävissä. [18, s. 2-13–2-14.] Monikeilainta voidaan käyttää pohjatopografian kartoituksessa ja sivulle kallistettuna myös seinien sekä muiden vedenalaisten pystyrakenteiden mittauksessa [17, s. 15].



Kuva 9. Monikanavainen kaikuluotain eli monikeilain. Monikeilain käyttää yhden keilaussäteen sijaan useampaa sädettä, jotka projisoidaan sivuille kuvassa esitetyllä tavalla (keltaiset alueet). Hydrofoni kuuntelee ääniaaltoja valkoisten alueiden osoittamista kohdista. [18, s. 2-13; 20, s. 12.] (Kuva: Pekka Helenius)

Monikeilaimen tuottama leveämpi keilausalue mahdollistaa mittausajan lyhenemisen, vähentää vierekkäisten mittauslinjojen väliin jäävien tyhjien kohtien muodostumista ja parantaa mittauksen luotettavuutta, koska linjojen reuna-alueille muodostuu päällekkäistä aineistoa (kuva 10) [18, s. 2-14; 21, s. 206].



Kuva 10. Mittauslinjojen peruseriaate. Mittausalus tuottaa pisteaineistoa kaistaleittain. Kuvassa katkoviiva kuvastaa aluksen kulkulinjaa. Kaistaleiden väliset päällekkäiset mittausaineistot on kuvassa korostettu keltaisten viivojen rajaamalla sinisillä alueilla. Mittausaluksen todellinen kulkulinja riippuu aluksen liikehinnästä, mittausympäristöstä sekä mittauksen olosuhteista. (Kuva: Pekka Helenius)

Päällekkäisten mittaushavaintojen osalta on mittausvirheiden minimointiin mahdollista käyttää linjojen välistä havaintojen ristiin vertailua, jolla virheelliseksi havaittava aineisto voidaan poistaa jälkikäsittelyprosessissa.

3.4 Laserkeilaus

3.4.1 Toimintaperiaate

Laserkeilaus on laservalon havainnointiin ja kantaman mittaukseen (LiDAR, Light Detection And Ranging) perustuva optinen mittaustekniikka, jota käytetään kolmiulotteisen pistetiedon keräämiseen ympäristön elementeistä, kuten infrastruktuurista, maaston topografiasta ja kasvillisuudesta. Tekniikalla tuotettua aineistoa voidaan hyödyntää ympäristön mallintamisessa ja erityyppisten analyysien tuottamisessa. [22, s. 3.]

Laserkeilaintekniikka perustuu ympäristöön lähetettyjen lasersäteiden taittuman ja etäisyyden havainnointiin, minkä perusteella tekniikkaa käyttävä mittauslaite eli laserkeilain muodostaa kolmiulotteisessa koordinaatistossa pisteistä muodostuvan pistepilven. Pis-

tepilvestä käy ilmi mitattujen kohteiden geometria, mitattujen pisteiden heijastusintensiteetti, palautuneiden lasersäteiden aaltomuototieto ja sironta kohteesta. Laserkeilauksen mittausresoluutio on sidonnainen laitteen ja kohteen väliseen etäisyyteen sekä tuotettujen laserpulssien keskinäiseen vaaka- ja pystysuuntaiseen tuottamistiheyteen. Eri materiaalit, kuten lehtipuut tai ikkunapinnat, heijastuvat ja rekisteröityvät laitteeseen toisistaan poikkeavalla tavalla. Mitattavasta materiaalista riippuen aineistoon voi syntyä häiriötä. [22, s. 17–18; 23, s. 3–5.]

3.4.2 Mittaustavat

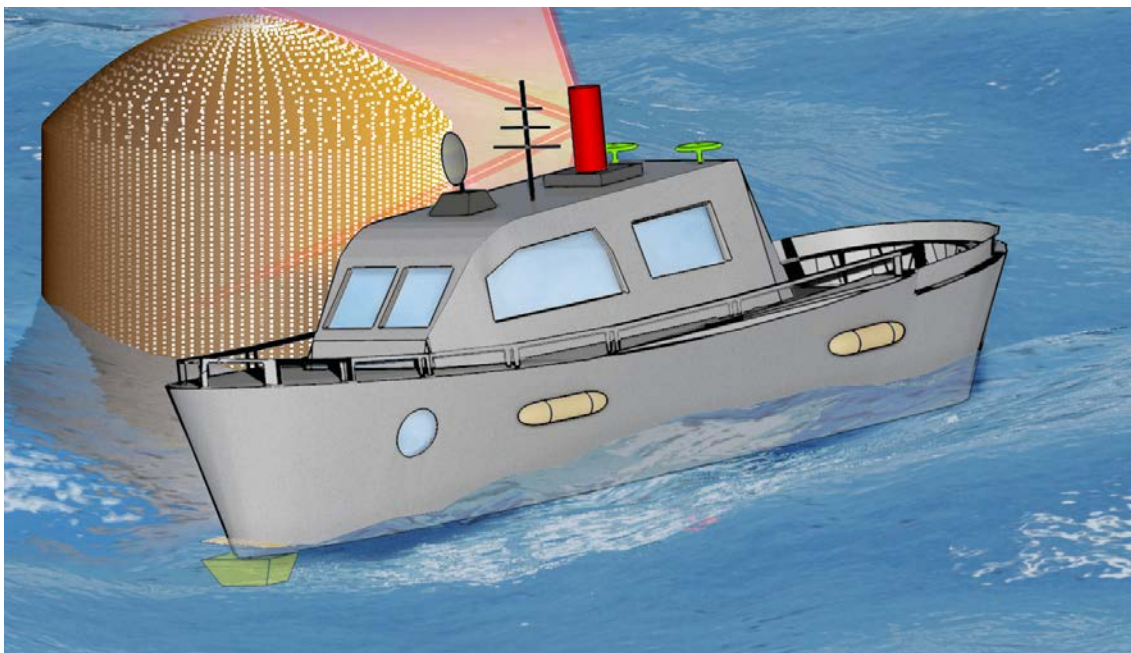
Laserkeilainmittaus voidaan toteuttaa kohteesta ja käytettävissä olevasta tekniikasta riippuen kolmella eri mittaustavalla:

- TLS-mittauksella (TLS, Terrestrial Laser Scanning) eli kiinteältä asemapisteltä toteutettavalla laserkeilauksella. Tunnetaan myös maalaserkeilauksena.
- ALS-mittauksella (ALS, Aerial Laser Scanning) eli ilma-aluksesta toteutettavalla laserkeilauksella. Tunnetaan myös ilmalaserkeilauksena.
- MLS-mittauksella (MLS, Mobile Laser Scanning) eli liikkuvasta aluksesta toteutettavalla laserkeilauksella. Tunnetaan myös mobiililaserkeilauksena.

TLS-mittausta käytetään yksittäisten kohteiden mittaamiseen maanpinnan tasolta käyttäen ympäristössä sijaitsevia kontrolli- ja kiinnityspisteitä (Control and Tie Points). ja MLS-mittausten georeferointi toteutetaan mittaamalla reaaliaikaisesti mittauslaitteen sijaintia suhteessa ympäristöön tai jälkilaskennalla. Lentokoneella, helikopterilla tai UAV-tyyppisellä lentolaitteistolla (UAV, Unmanned Aerial Vehicle), kuten multikopterilla toteutettavan UAS-mittauksen (UAS, Unmanned Aerial Scanning) aineistoa voidaan hyödyntää digitaalisten pinta- ja maastomallien tuottamisessa. Laserkeilauksen mittauksetapojen yhdistämällä saadaan kohteesta tuotettua kattavampaa aineistoa. [24, s. 163; 25, s. 89.]

Yhdistetyssä laserkeilausaineistossa on huomioitava laserkeilaimen koordinaatisto-orientointi, mittausetäisyys, -kulma, ja -nopeus sekä laitteiston toimintaan vaikuttavat muut tekijät, jotka voivat vaikuttaa kappaleesta muodostetun pistepilviaineiston profiiliin [17, s. 19–21].

Taipaleen kanavan vedenpäällisen laserkeilausaineiston mittaus toteutettiin MLS-mittaukseen perustuvalla menetelmällä maalaserkeilaimella, jonka skannauskulma oli lukittu sivulle (kuva 11). Vedessä operoivaan mittausalukseen liitetyn laserkeilaimen toiminnassa tulee huomioida käytetty kulkunopeus sekä veden pinnasta ja muista heijastuvista materiaaleista aiheutuvien monitieheijastusten esiintyvyys. Kulkunopeuden tulisi olla riittävän alhainen ja tasainen, jotta laserkeilaimella tuotetun pisteaineiston tiheys olisi riittävä. [17, s. 19, 22.]



Kuva 11. Liikkuvan mittausaluksen laserkeilaimella tuotetaan pisteaineistoa vedenpäällisistä kohteista. Aluksessa voidaan käyttää myös TLS-mittaukseen tarkoitettua laserkeilainta, jonka keilauskulma on lukittu sivulle [17, s. 17]. (Kuva: Pekka Helenius)

3.5 Mittausaluksen paikan-, asennon- ja suunnanmäärittystekniikat

3.5.1 Paikan- ja suunnanmäärittäminen

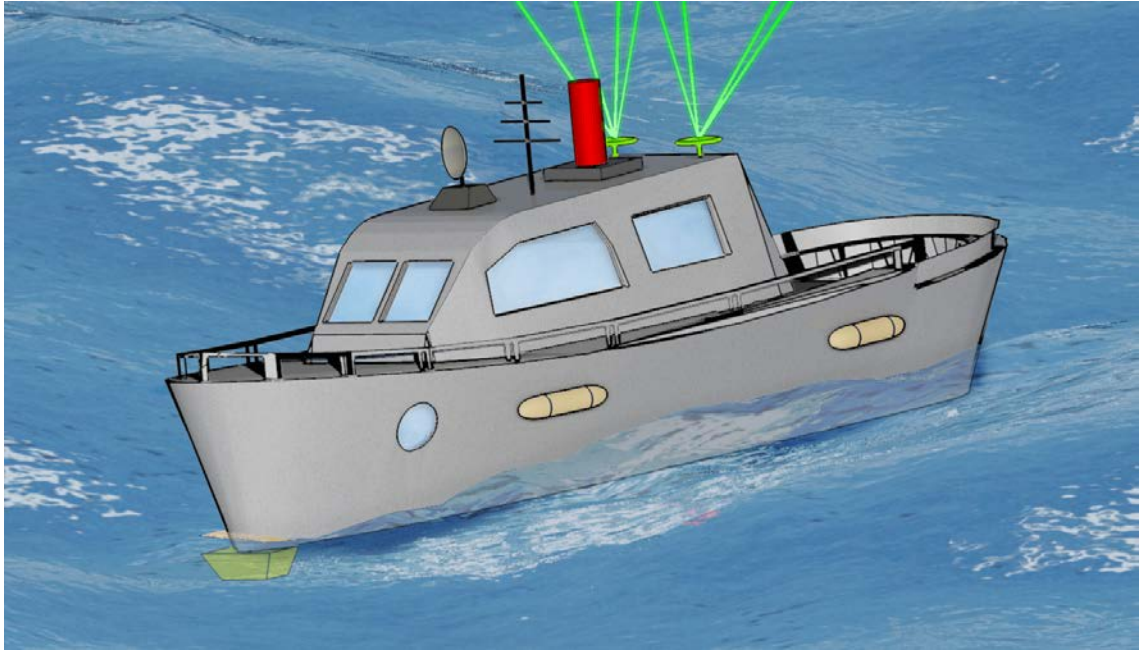
Mittausaluksen sijainti- ja nopeustieto ajan suhteen saadaan käyttämällä GNSS-vastaanottimia (GNSS, Global Navigation Satellite System) ja DGNSS-teknologiaan (DGNSS, Differential Global Navigation Satellite System) pohjautuvia paikanmäärittämenetelmiä. GNSS-vastaanotin mittaa useammasta satelliittipaikannusjärjestelmästä sijaintitietoa ja tarkentaa sitä käyttämällä lähistöllä sijaitsevan staattisen GNSS-tukiaseman mittaamaa paikanmäärittäksen korjaustietoa eli differentiaalisella mittauksella. Differentiaalimittaus perustuu joko fyysistä tukiasemaa käyttävään RTK-

menetelmään (RTK, Real Time Kinematic) tai virtuaalitukiasemaa hyödyntävään VRS-menetelmään (VRS, Virtual Reference Station). Käyttäjän GNSS-vastaanotin muodostaa kummassakin tapauksessa NTRIP-protokollaan (NTRIP, Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) perustuvan verkkoyhteyden GPRS-modeemilla (GPRS, General Packet Radio Service) korjauslaskennan suorittavaan tietokonepalvelimeen, johon korjaavaa sijaintitietoa havainnoiva RTK-tukiasema on yhdistetty tai joka tuottaa käyttäjään nähden lähimmän tukiaseman sijaintitietoja rekisteröimällä sekä ympäristöstä havainnoituja häiriötietoja interpoloimalla virtuaalisen tukiaseman paikan käyttäjän GNSS-vastaanottimen viereen. GNSS-järjestelmään sellaisenaan liittyvät mittausepätarkkuuksia voidaan korjata myös jälkilaskentana, mikäli vastaanottimien mittaushetkellä käyttämän satelliittikonstellaation geometriatieto ja havaittujen satelliittien ratatieto on ulkopuolisesta tietolähteestä saatavilla. [22, s. 33–35; 26, s. 3; 27.]

Aluksen suuntakulman määrittämiseen tarvitaan useampaa GNSS-vastaanotinta, joiden keskinäinen etäisyys on tunnettu (kuva 12). Suuntakulman ja nopeuden määrittämisellä voidaan monikeilaimen kaikupistehavainnot (Soundings) sitoa aluksen paikkaan luotettavasti.

Toimiakseen GNSS-vastaanotin tarvitsee yhteyden vähintään neljään satelliittiin. Paikanmääritys on luotettavampaa, mikäli havaittavia satelliitteja on useampia ja mittaushetkellä taivaanpallolla sijaitsevan satelliittikonstellaation geometria suhteessa vastaanottimeen on hajanainen, eli DOP-arvo (DOP, Dilution Of Precision) on alhainen. [22, s. 33; 28, s. 56.] Paikanmäärityksen tarkkuuteen vaikuttavat lisäksi satelliittien näkyvyys GNSS-vastaanottimeen, yhteyden laatu korjaussignaalia tuottavaan tukiasemaan, monitieheijastusten esiintyvyys, voimalinjoista syntyvien sähkömagneettisten häiriöiden voimakkuus ja GNSS-vastaanottimissa käytetty avauskulma. GNSS-vastaanottimille ongelmallisia havaintopaikkoja ovat taivaan satelliittikonstellaatioon nähden katveiset alueet, kuten sillanaluset.

GNSS-teknoologiaan pohjautuvat laitteet käyttävät paikanmääritykseen maailmanlaajuisia satelliittipaikannusjärjestelmiä, joita ovat yhdysvaltalainen GPS (GPS, Global Positioning System), venäläinen GLONASS (GLONASS, GLObal NAVigation Satellite System) sekä kehityksessä olevat eurooppalainen Galileo ja kiinalainen BeiDou [29, s. 1].



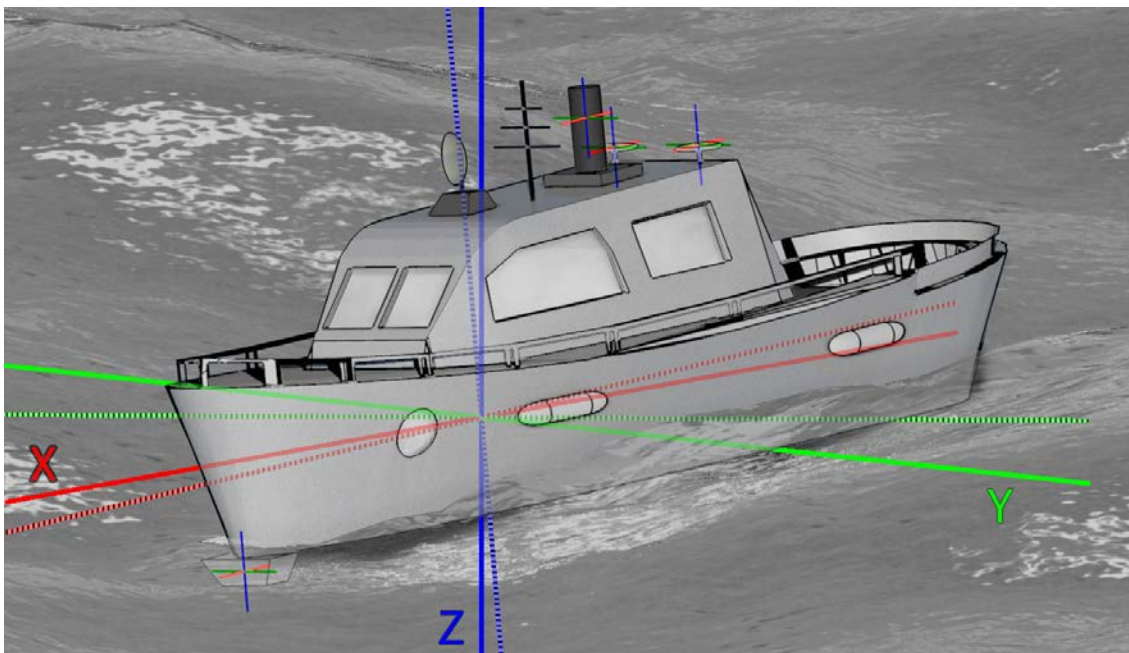
Kuva 12. Mittausaluksen paikanmäärittämisessä käytetään kahta GNSS-antennia, jotka vastaanottavat paikkatietoa maapalloa kiertävistä satelliiteista sekä paikanmäärittäystä täsmentävää korjausdataa lähellä sijaitsevasta tukiasemasta. (Kuva: Pekka Helenius)

3.5.2 Asennonmäärittäminen

Mittausalus altistuu merenkäynnille, eli se on dynaamisessa liikkeessä. Aluksen mittausjärjestelmät ottavat huomioon ympäristön aiheuttaman liikkeen mukautuen siihen. Liikkeen vakauttamista varten mittausaluksen runkorakenteessa voi olla köli, ja aluksessa sisäänrakennettu inertianavigointijärjestelmä (INS, Inertial Navigation System). INS-järjestelmä mittaa sekä kompensoi aluksen kulmakiertymää ja tasaa laitteistoihin kohdistuvaa liikettä suhteessa kiertymättömään, laitteistojen muodostamaan erilliskoordinaatistoon (kuva 13). Aluksen rungossa voidaan käyttää aallokon liikettä tasaa-
via, INS-järjestelmään liitettyjä eviä. [22, s. 18, 35, 38; 30.]

Inertianavigointijärjestelmä koostuu IMU-yksiköstä sekä laskentatietokoneesta. IMU-yksikkö mittaa koordinaattiakseleissa tapahtuvia liikkeitä kiihtyvyyssantureilla ja koordinaatistoakselien kaltevuuksissa tapahtuvia muutoksia gyroskoopilla. [22, s. 35.] X-akselin suhteen tapahtuvaa kulmamutosta kutsutaan kallistukseksi (Roll), Y-akselin suhteen tapahtuvaa muutosta nousuksi (Pitch) ja Z-akselin suhteen tapahtuvaa muutosta kääntymiseksi (Yaw) [31, s. 52–53]. Vesialuksissa Z-akselin mukainen kääntymiskulma tunnetaan ohjaussuuntana tai suuntana (Heading).

INS-järjestelmä toimii synkronoidusti GNSS-järjestelmän kanssa, mikä parantaa paikantiedon laatua. GNSS-järjestelmä korjaa mittausaluksen sijaintia suhteessa ulkoiseen koordinaatistoon. GNSS-vastaanottimien tuottama sijaintitieto voi kuitenkin paikoitellen olla epätarkkaa, virheellistä tai heikkolaatuista, jolloin INS-järjestelmä kompensoi GNSS-järjestelmän toimintavajetta lyhyellä aikavälillä. Vastaavasti GNSS-järjestelmä kompensoi INS-järjestelmän tuottamia virheellisiä kiihtyvyyssarvoja, mikäli niitä esiintyy mittauksen aikana. [22, s. 33–34.]



Kuva 13. Mittausaluksen inertiamittausjärjestelmä mittaa koordinaattiakselien kulmavääristymiä. Aluksen laitteet hyödyntävät mitattua kulmatietoa asentotiedon korjauksessa. Kuvassa kiertymätön XYZ-referenssikoordinaatisto on esitetty aluksen liikkeen mukaan kiertyneeseen, katkoviivoilla esitettyyn XYZ-koordinaatistoon suhteutettuna. (Kuva: Pekka Helenius)

INS-järjestelmää ei voida käyttää pitkäjaksoisesti paikanmäärittelyyn, koska IMU-yksikön gyroskoopin ja kiihtyvyyssanturin tuottamat paikkavirheet kasvavat ajan myötä ja vaikuttavat siten aineiston mittaustarkkuuteen. GNSS- ja INS-järjestelmien välissä käytetään digitaalista Kalman-suodinta, joka arvioi ja suodattaa reaaliaikaisesti kerätyn sijaintitiedon arvioidut virheet parantaen näin ollen mittauksen kokonaisluotettavuutta. [22, s. 33–34; 32, s. 129–130.]

GNSS- ja INS-järjestelmät muodostavat yhdessä aluksen sijainti- ja orientaatiojärjestelmä (POS, Position and Orientation System) [24, s. 163]. Järjestelmien muodostamasta kokonaisuudesta käytetään myös nimitystä GNSS/INS tai GNSS/IMU. Järjestelmäkokonaisuuteen voidaan liittää keilaintekniikkaa käyttävä yksikanavainen kaiku-

luotain tai monikeilain, vedenpäällistä aineistoa mittaava laserkeilain sekä pisteaineiston RGB-värjäykseen käytettäviä kameroita. POS-järjestelmästä saatava paikka- ja orientaatiotieto lähetetään aluksen mittausaineistoa tuottaville laitteille niin, että aineisto kyetään orientoimaan oikeaoppisesti käytettyyn ulkoiseen koordinaatistoon ja viereisiin mittauslinjoihin nähden käsittelyprosessia varten.

Vedenalaisten kohteiden mittatarkkuus määräytyy pitkälti mittausaluksessa olevien laitteiden kalibroinnin, synkronoinnin ja mittatarkkuuden, käytettyjen ohjelmistoasetusten sekä sääolosuhteiden perusteella. Laitteiston sijainti täytyy sitoa aluksen sisäiseen koordinaatistoon, jotta mitatun tiedon luotettavuus säilyy. Mikäli aluksen mittauslaitteisto osuu esimerkiksi johonkin vedenalaiseen rakenteeseen niin, että sen sijainti aluksen sisäisessä koordinaatistossa muuttuu eli kalibroitarkkuus heikkenee, on kalibrointi suoritettava uudelleen. Laitteiston kalibroitarkkuutta pystytään kontrolloimaan mittausprosessin aikana. [17, s. 22, 26.]

4 Mittausaineiston laatutekijät

4.1 Virheet ja tarkkuus

4.1.1 Vedenalaisiin prosesseihin liittyvät virhetekijät

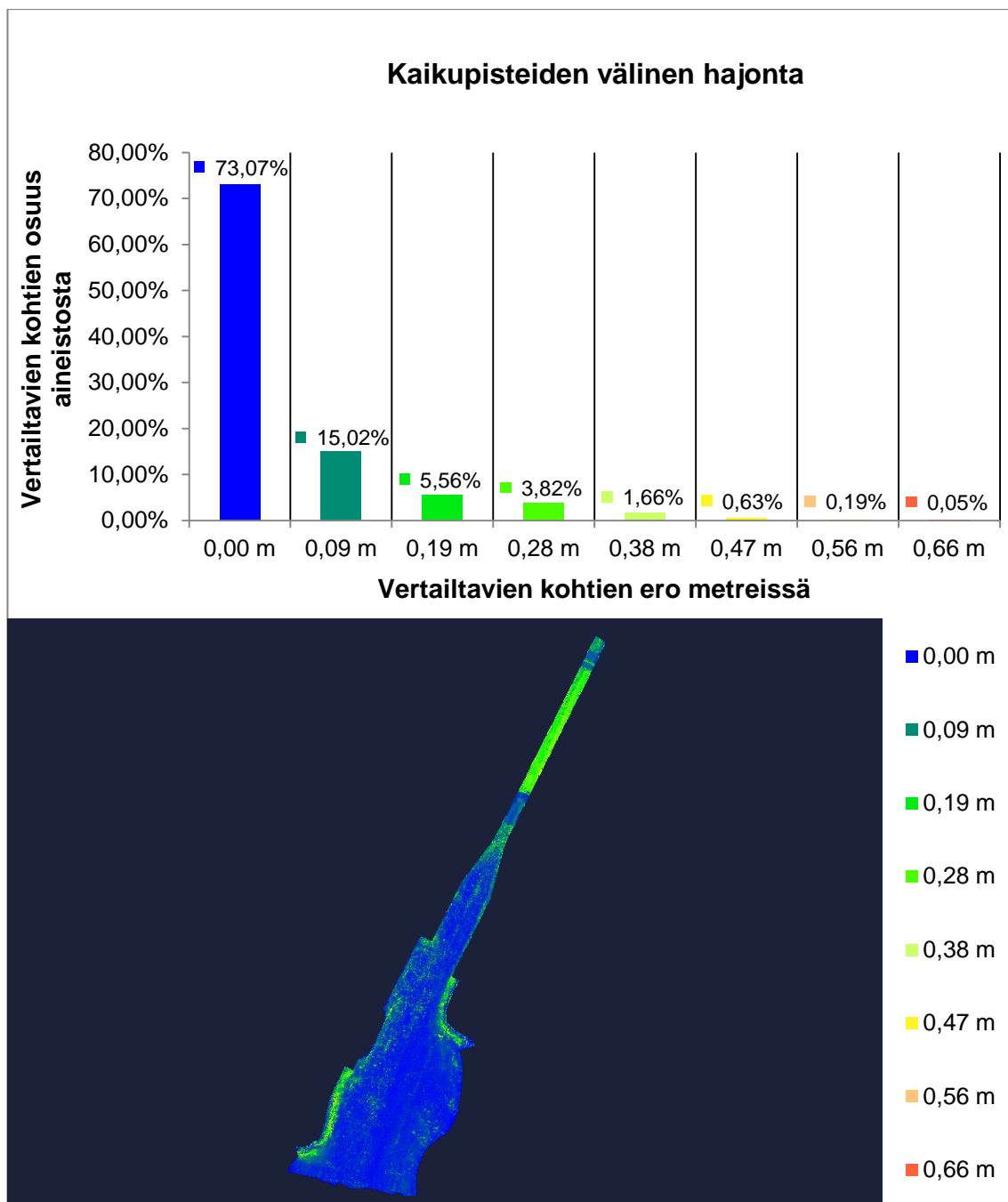
Vedenalaiset pinnanmuodot altistuvat paikallisille fluviaaliprosesseille, joilla tarkoitetaan vedenalaisten pintamateriaalien ja sedimenttien eroosiota, kuljetusta ja kasautumista veden virtauksen vaikutuksesta ajan kuluessa. Luonnollisten vedenalaisten prosessien lisäksi muun muassa vesialuksien potkuritoiminta aiheuttaa muutoksia pohjatopografiaan ja vaikuttaa vedenalaisten substanssien profiileihin. Koska vesiympäristö on dynaaminen, ovat mitatut kaukupisteet luotettavuutensa suhteen aikaan sidottuja. [17, s. 28; 33, s. 4–5.]

4.1.2 Kaikuluotaintekniikkaan liittyvät virhetekijät

Kaikuluotaintekniikalla tuotetun aineiston tarkkuus on sidonnaista mittausaluksen järjestelmäkonfiguraation ja kalibroinnin tarkkuuteen. Kaikuluotaintekniikalla mitattu aineisto sisältää lisäksi hajontaa, joka muodostuu kaikuluotaimella tuotettujen ja havaittujen ääniaaltojen vedenalaisissa materiaaleissa käyttäytymisen seurauksena. Hajonnal-

la tarkoitetaan tässä asiayhteydessä yksittäisestä kohteesta muodostettujen kaikupistehavaintojen syvyysarvojen päällekkäisyyttä ja vedenalaisista kappaleista muodostettujen pisteiden säteilyä ympäristöön, mikä aiheuttaa tulkinnanvaraisuutta kohteiden tosiasiallisen ulottuvuuden määrittämisessä. [21, s. 205.]

Taipaleen kanavan pohja-aineistossa kaikupisteiden hajonta on oheisen kaavion 1 mukainen:

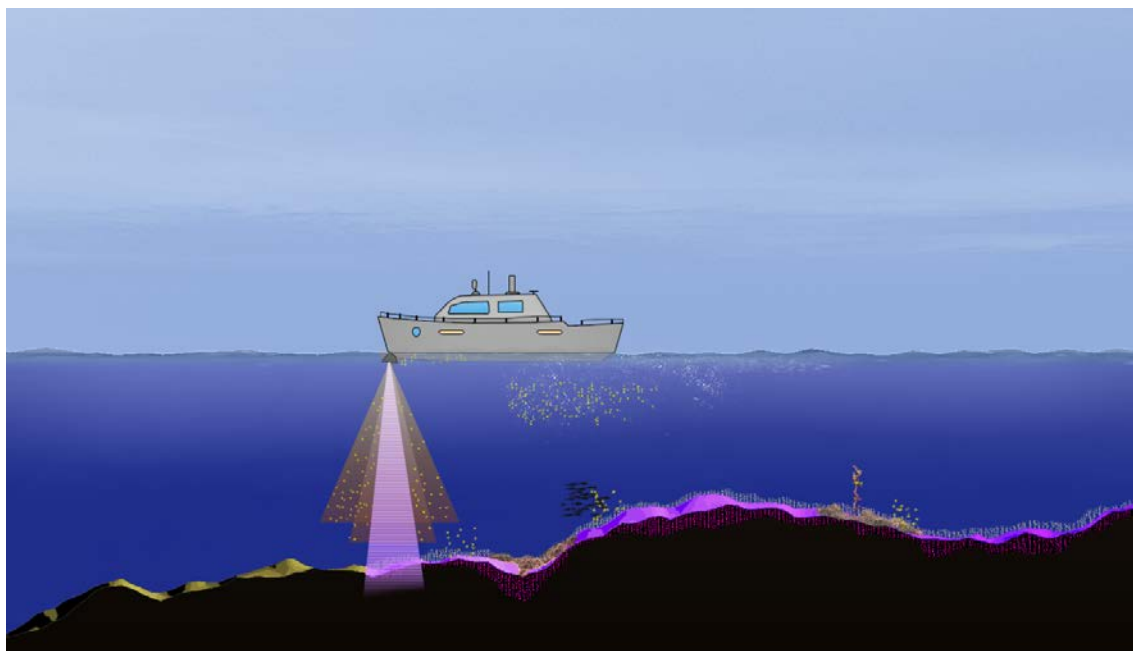


Kaavio 1. Taipaleen kanavan pohjasta tuotetun pisteaineiston hajonta. Kanavan pohjoisosan hajonta johtuu pohjan irtaimistosta, kuten puunrungoista ja kivistä. Pisteaineiston hajontaa esiintyy myös kanavaa ympäröivissä vedenalaisissa luiskoissa.

Mittauksen akustista tarkkuutta arvioidessa on huomioitava hajonnan lisäksi vedenalaiset virhelähteet, joilla tarkoitetaan mittaukseen kuulumattomia äänihavaintoja. Niitä syntyy muun muassa vesipatjassa sijaitsevien irtonaisten partikkeleiden, veden aaltoilun ja pyörteilyn seurauksena sekä vesieliöstön, mittausaluksen ja muiden alusten toi-

minnasta. Lisäksi pohjan sedimenttien ominaisuudet vaikuttavat aineiston laatuun (kuva 14). Laitteiston elektroniikka voi myös itsessään tuottaa väärää äänihavaintoja eli kohinaa (Noise). Kohinan vahvuutta mitataan kohinatasolla (Noise Level). Kohinatason ja rekisteröityjen äänihavaintojen suhdetta mitataan signaali-kohinasuhteella (SNR, Signal-to-Noise Ratio), jota käytetään laitteiston tuottaman kohinan suodattamiseen pois mittausaineistosta. Kohinataso määrittää, kuinka pieniä havaintoja aineistosta pystytään erottamaan luotettavasti. [18, s. 2-5; 34, s. 1–2.]

Muita keilaintekniikan virhelähteitä ovat ylimääräiset, pääasiallisesti veden mataluuden aiheuttamat vedenpinnan heijastumat eli monitieheijastukset ja keilaussuuntaan nähden muodostuvat sivu- ja takakeilat [17, s. 22; 35].

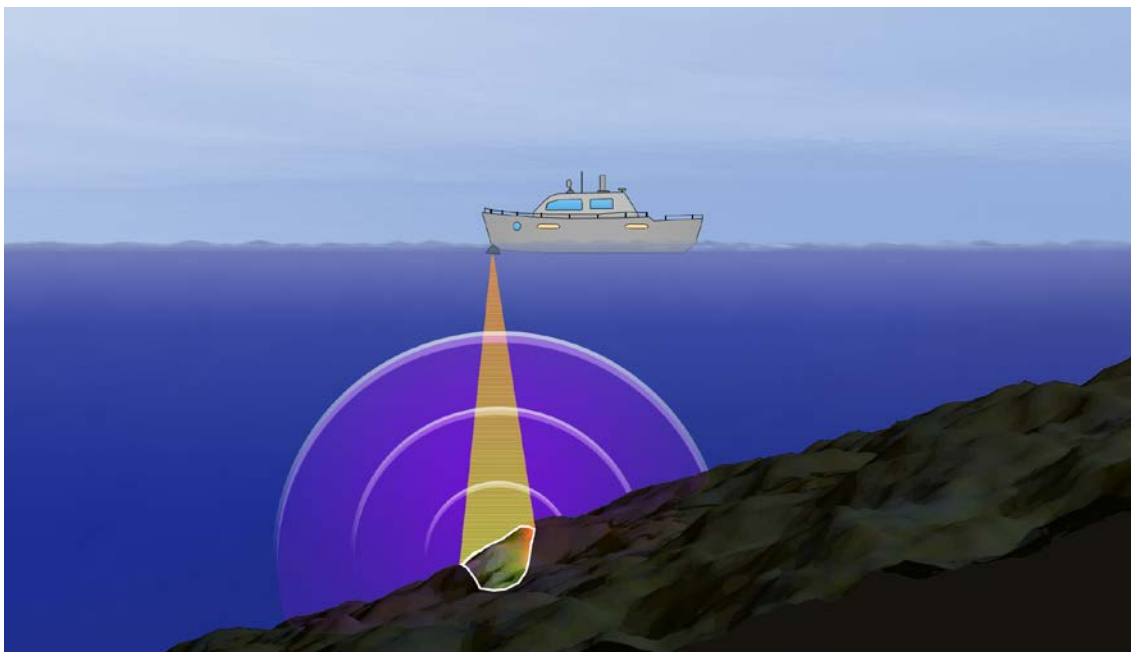


Kuva 14. Vedenalaisen mittauksen virhelähteet. Virheellistä pisteaineistoa muodostuu kaikuluotaimen toiminnan, vedenalaisten kuplien, vesipatjan irtonaisten partikkelien, vesieläinten ja pohjan materiaalien kovuuserojen seurauksena. Kaikuluotaimen tuottamat sivukeilat on esitetty keltaisina säteinä. (Kuva: Pekka Helenius)

4.1.3 Keilaussäde ja pohjatopografian resoluutio

Merenmittauksessa ihanteellisin mittaus kohdistuu suoraan luotaimen alla sijaitsevaa pohjaan, josta kaikuluotaimen tuottamat ääniaallot heijastuvat takaisin (kuva 15). Koska pohjanmuodot ovat epäsymmetrisiä, määritetään aineiston mittaustarkkuuden takaamiseksi mittauslaitteiston lähettämille ja laitteistoon palaaville ääniaalloille enim-

mäis- eli avauskulma, jonka ulkopuoliset havainnot suodatetaan automaattisesti pois. Tämän avauskulman tulee olla tarpeeksi pieni vääränlaisten havaintojen minimoimiseksi. Yksittäiset keilat voidaan jakaa käytettävään mittauslinjaan joko tasaetäisyyksillä tai tasakulmilla.



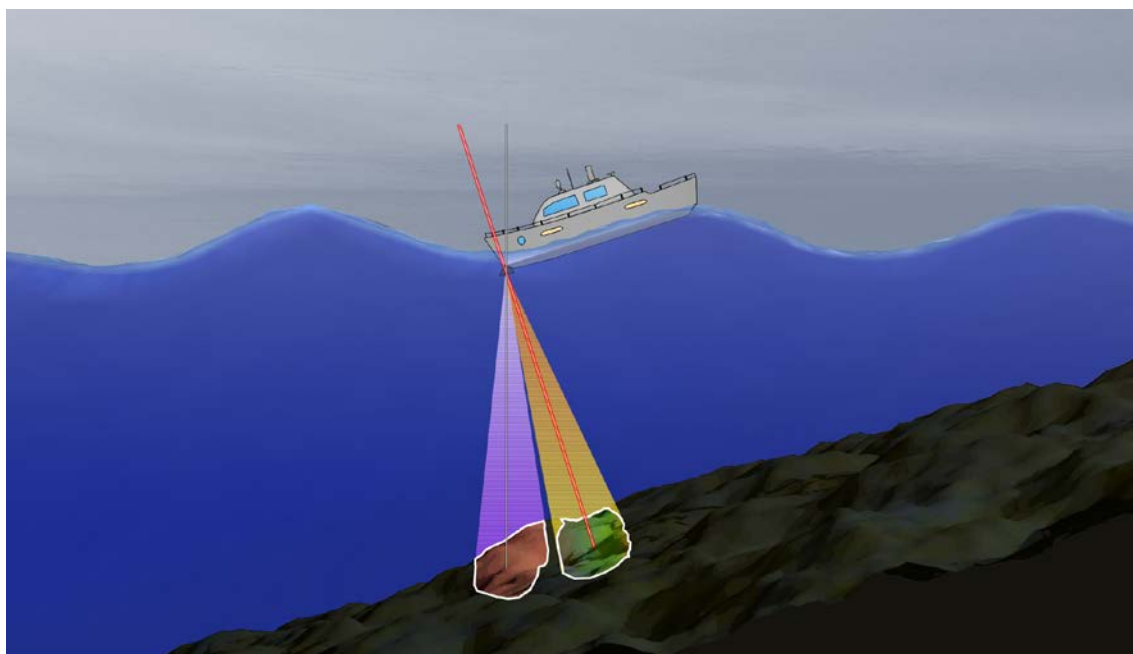
Kuva 15. Kaikuluotaimen tuottamat ääniaallot heijastuvat mittausalueen rajaamasta pohjasta ympäristöön. (Kuva: Pekka Helenius)

Kaikuluotaimen säteen avauskulman suuruus määrittää, kuinka tarkkaan ja laajalti laitteisto pystyy mittaamaan pohjan sijaintitiedon. Keilainlaitteiston muodostaman aineiston resoluutio eli yksittäisten kaikupistehavaintojen tiheys määräytyy säteen avauskulman suuruuden ja säteen havainnoiman pohja-aineiston syvyyden mukaan: mitä syvemmälle kaiku kulkeutuu, sen laajemmalle alueelle myös keilaussäde levittäytyy ja sen heikompi on aineiston resoluutio. Resoluutioon vaikuttaa myös kaikuluotainlaitteiston käyttämä äänen taajuus, kaikujakson tiheys sekä aluksen kulkunopeus. Matalampaa taajuutta käyttävät ääniaallot kantautuvat vedessä pidemmälle ja saavuttavat näin ollen syvemmällä sijaitsevat kohteet. Toisaalta korkeammalla taajuudella vedenalaisista kohteista saatava vaste ja siten myös pisteaineiston tarkkuus ja erottelukyky on parempi. Nämä aluksen järjestelmäkonfiguraatioihin liittyvät parametrit optimoidaan mittauskohteen ja laitteiston teknisten ominaisuuksien mukaan. [18, s. 2-10–2-11; 20, s. 13–14.]

Keilaussäteen kulman kasvattamisella voidaan nopeuttaa vedenalaisista kohteista mitatun tiedon keruuta, mutta tällöin mittausvirhe on suurempi säteen reuna-alueilta kerätyn pistedatan osalta. Näin ollen pohjaprofiilin tarkkuus näiltä osin heikkenee riippuen mittausalueen syvyydestä ja äänennopeusprofiilissa tapahtuvista muutoksista. Keilaussäteen säännöllinen epätarkkuus erottuu yhdenmukaisena topografisena hajontana mittauslinjojen mukaan tuotetun aineiston päällekkäisillä reuna-alueilla.

4.1.4 Mittausolosuhteisiin liittyvät tarkkuustekijät

Ääniaaltojen kulmasuodin ei yksistään minimoi mittausepätarkkuutta riittävästi. Mittausalus altistuu merenkäynnille, lähinnä tuulelle ja aallokelle (kuva 16). Jatkuva liike aiheuttaa kulmavääristymiä kaikuluotaimen havaintoihin. [18, s. 2-10.] Aluksen INS-järjestelmä pystyy kompensoimaan veden aiheuttamaa liikehdintää jonkin verran, mutta kova merenkäynti voi olla vakava ongelma mittauksen toteuttamiselle ja mittausaineiston tarkkuudelle riippuen käytettävän aluksen massasta ja liikehinnästä vedessä. Kovassa merenkäynnissä koordinaatiston kulmavääristymät voivat olla useita kymmeniä asteita, jolloin mittausvirheet kasvavat liian suuriksi. Tällöin mittaus toteutetaan tyyneämpänä ajankohtana tai uusitaan osittain huonojen havainnointialueiden osalta.



Kuva 16. Mittausalus altistuu merenkäynnille, millä on vaikutusta kaikuluotaimen mittauskulmaan ja siten myös mitatun aineiston laatuun. Inertiamittausjärjestelmä pystyy kompensoimaan aluksen liikehinnästä aiheutuvia kulmavääristymiä järjestelmän toimintarajojen ja mittauksessa hyväksytyjen toleranssirajojen puitteissa. (Kuva: Pekka Helenius)

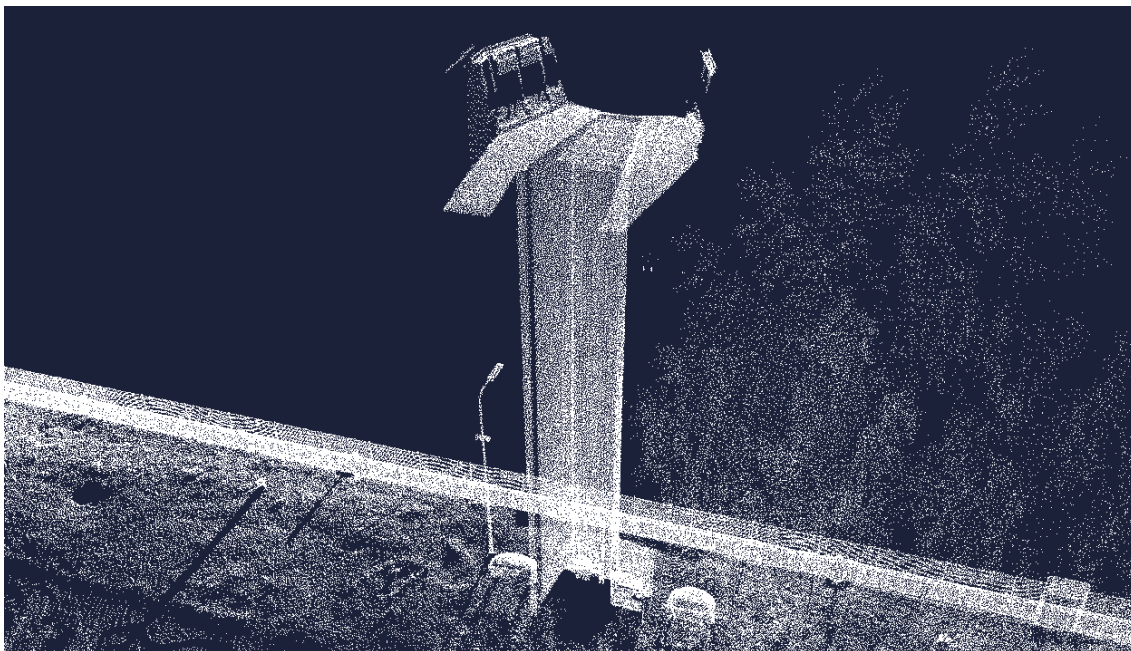
4.2 Katvealueet

Katvealueilla tarkoitetaan mitatussa aineistossa olevia ympäristön kohtia, joista ei ole kyetty saamaan tietoa käytetyillä mittausmenetelmillä ja -laitteistoilla. Katvealueita esiintyy laserkeilaus-, kaikuluotain-, fotogrammetria- ja tutkapohjaisissa mittausaineistoissa. Katvealueiden esiintyminen mittausaineistossa johtuu siitä, että mittauslaitteen havainnointikulma tai -sijainti suhteessa niihin on tiedon keräämisen kannalta epäoptimaalinen.

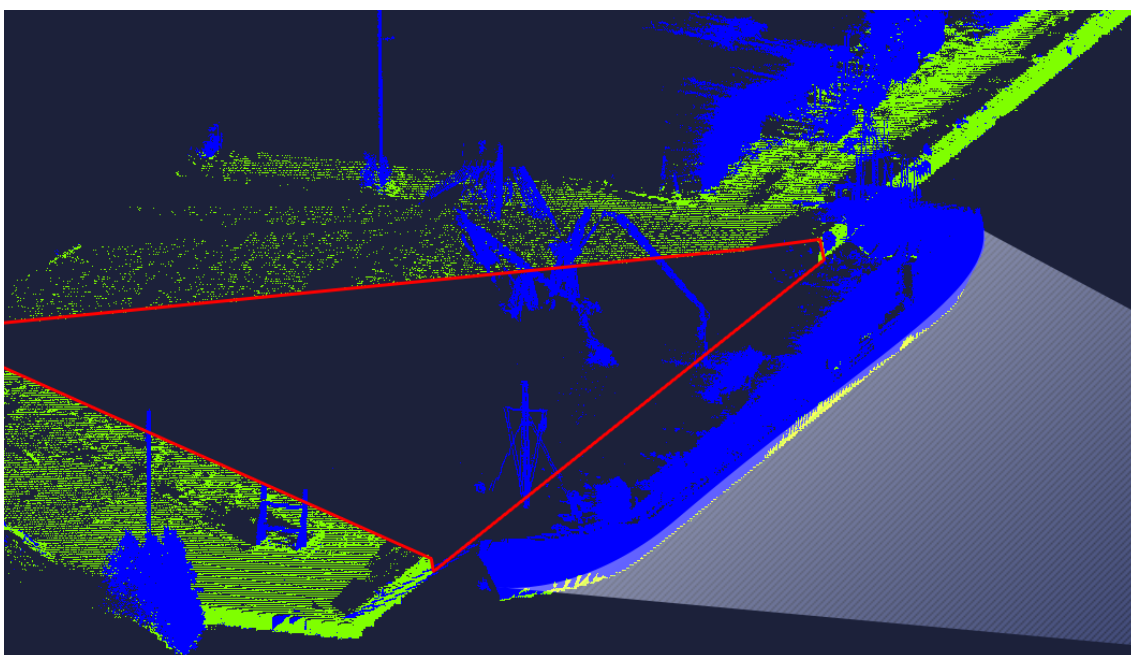
Mittausaluksesta käsin tapahtuvissa mittauksissa esimerkkejä katvealueista ovat rakennusten julkisivujen tai puiden takana olevat kohteet. Vedenalaisissa mittauksissa tyypillisiä katvealueita ovat esimerkiksi laiturin vedenalaisten pilareiden takana olevat kohteet, vedenalaisten rakenteiden yläpinnat sekä kaikki ne alueet, joihin mittausalus ei ole esimerkiksi veden mataluuden, vesialueen rajoittuneisuuden tai laiturissa kiinni olleen toisen aluksen vuoksi kyennyt liikkumaan.

Veden rajaan, laser- ja kaikuluotausaineistojen väliin syntyvien katvealueiden minimointi on huomioitava mittausprosessissa. Veden rajan katvealueita voidaan vähentää suorittamalla vedenalainen mittaus korkean veden aikana ja laserkeilaus matalan veden aikana, minkä seurauksena aineistojen välille syntyy päällekkäisyyttä, mikä parantaa myös mittauksen luotettavuutta [17, s. 23].

Taipaleen kanavan mittausaineistossa katvealueita esiintyi pääosin vedenpäällisessä laserkeilainaineistossa. Katvealueita oli kokonaisuutensa kaikissa niissä ympäristön kappaleissa, jotka eivät näkyneet suoraan kanavassa kulkeneen mittausaluksen laserkeilainlaitteistolle. Nämä kappaleet sisältävät pisteaineistoa siis vain toispuoleisesti, toisen puolen jäädessä pitkälti pimentoon (kuvat 17 ja 18).



Kuva 17. Laserkeilaimella mittausaluksesta käsin tuotettuun mittausaineistoon jää katvealueita. Kuvassa Taipaleen kanavan käyttökustorni, jonka yläpuoliset ja kanavaan nähden taakse jäävät osat ovat jääneet katveeseen. (Kuva: Pekka Helenius)



Kuva 18. Mittaushetkellä Taipaleen länsilaiturissa kiinni ollut alus on aiheuttanut katvealueita niin vedenpäälliseen kuin vedenalaiseenkin mittausaineistoon. Katvealue on rajattu punaisella viivalla, mittaussuunta oikealta. (Kuva: Pekka Helenius)

Laserkeilausaineiston katvealueiden vähentämiseksi tulisi mittaus toteuttaa sekä veneestä että maalta käsin. Käytännössä tämä tarkoittaisi mittausaluksesta toteutetun

MLS-mittauksen lisäksi TLS-mittausta kanavan maanpinnan rakenteille ja ALS-mittausta kanavarakenteiden yläpinnoille.

4.3 Kaikupisteiden virheiden prosessointi

Mittausaineistoa prosessoidaan ja visualisoidaan vedenalaisen aineiston käsittelyyn tarkoitetuilla paikkatieto-ohjelmistoilla [17, s. 14]. Säännöllisiä virheitä ja tunnetuista virhelähteistä muodostuneita ylimääräisiä pisteitä poistetaan manuaalisia työmenetelmiä ja automaattisia virheidenpoistoalgoritmeja hyödyntäen [34, s. 2]. Mittauksenaikaiset olosuhteet vaikuttavat merkittävästi virheiden esiintyvyyteen. Vaikka jälkikäsitelystä virheitä kyetään poistamaan, voivat selkeät mittauksessa tapahtuneet häiriöt jättää tyhjiä tai huonoja kohtia prosessoituun pisteaineistoon ja kasvattaa aineiston prosessointiaikaa huomattavasti. [17, s. 14; 34, s. 2.]

Virheidenpoistoalgoritmeja on kehitetty 1990-luvulta lähtien vähentämään aineiston käsittelyaikaa, joka on keskeinen ongelma manuaalisessa aineistonkäsittelyssä. Automaattiset virheenpoistoalgoritmit voidaan jakaa mittausdatan suoraan analysointiin sekä mittauslaitteistosta saadun metatiedon analysointiin. Mittausdatan analysointiin perustuvat virheenpoistomenetelmät käyttävät painotetun keskiarvon ja keskihajonnan menetelmiä pistemassan syvyystarkkuuden arviointiin. [34, s. 2.]

Virheiden havaitsemiseen käytetään tilastotieteeseen perustuvia menetelmiä, jotka arvioivat vierekkäisten kuutioihin paloiteltujen pisteryhmien keskinäisen koon vaihtelevuutta piikkimäisten, virheellisten pisteiden havaitsemiseen mittausaineistosta. Nämä kaikupisteaineiston karkeat virheet (Gross Errors) muodostuvat moninaisten satunnaisprosessien seurauksena. [34, s. 3.] Optimaalinen koko pisteaineistoa osiin jaotteleville kuutioille riippuu aineiston mittautarkkuudesta ja tuotettavan mallin tavoitetarkkuudesta. Aineistoon nähden liian pienen kuutiokoon käyttäminen rikkoo mallin rakenteen, kun taas liian suuren koon käyttäminen jättää huomiotta mitattuja kaikupisteitä ja poistaa siten aineistoon sisältyviä yksityiskohtia. [34, s. 6.]

Laitteistosta saadun metatiedon analysoinnissa kyetään tunnistamaan virheellisesti rekisteröidyt kaikuhavainnot käyttäen automaattisia pistesuotimia, jotka perustuvat robustisiin tilastotieteellisiin menetelmiin (Robust Statistics), kuten kriging-interpolointiin ja M-estimaattoreihin. Pistesuotimet arvioivat keilausprosessin aikana käytettyjen mit-

tausparametrien epätasällisyyttä sekä mittauslaitteiston rekisteröimää metatietoa syvyys- ja mittausarvoihin liittyvistä virheistä. Kaikupisteiden välistä hajontaa tulkitaan aineiston keskijakauman ja keskiarvostetun Gaussin käyrän mukaan arvioidun pohjaprofiilin suhteen. [34, s. 2–3.]

Koska automaattinen virheentunnistus ei ole täysin luotettavaa, tarvitaan datan prosessoinnissa myös manuaalisia pistetiedon varmennus- eli validointimenetelmiä. Näin ollen automaattinen ja manuaalinen pistetiedon prosessointi tukevat toisiaan. [34, s. 2.]

Vedenalainen mittausaineisto on mittauslinjojen käytöstä johtuen kaistalemaista. Kaistaleiden reuna-alueilla on keilaintekniikasta johtuvia virheitä. Kaistaleiden yhteensovitus tapahtuu dynaamisesti käyttäen tilastomatemattisia ja morfologisia eli muoto-opillisia analysointimenetelmiä havaittuihin ja validoituihin kaikupisteisiin [34, s. 3].

Virheiden ja mitatun aineiston laadun arvioinnissa tulee aineiston analysoinnin lisäksi ottaa huomioon myös monikeilaimen teoreettinen mittaustarkkuus. Monikeilaimen teoreettinen mittatarkkuus sellaisenaan on kuitenkin ongelmallinen, sillä se ei ota huomioon mittausalueen syvyyttä, keilaussäteen kulmaa, merenpohjan tyyppiä tai mittauksessa käytettyjen ääniaaltojen taajuutta. Näillä laitteiston toimintaan liittyvillä tekijöillä on kuitenkin merkittävä vaikutus mittauksen kokonaisvirheeseen ja siten pisteaineistosta luotavan mallin tarkkuuteen. [21, s. 205.]

5 Käytetyt paikkatietomallit

5.1 Paikkatietomallin määritelmä

Paikkatietomalli on tietokonepohjainen, todellisesta maailmasta luotu binäärimuotoinen paikkaan sidottu malli. Paikkatietomallin aineisto on kerätty rajatulta maastoalueelta erinäisillä mittauslaitteilla. Mallissa korostetaan mielenkiinnon kohteina olevia asioita, jotka esitetään joko graafisesti tai tekstimuotoisena tietokoneella. Johtuen paikkatietomallien tietokonepohjaisesta luonteesta paikkatietomalli tunnetaan myös symbolisena mallina (Symbolic Model). [36, s. 25.] Työssä Taipaleen kanavan mittausaineiston yhteydessä esitetyt paikkatietomallit kattavat lähtöaineistona toimineen pistepilven sekä siitä prosessoidut ruutu- ja vektorimallit.

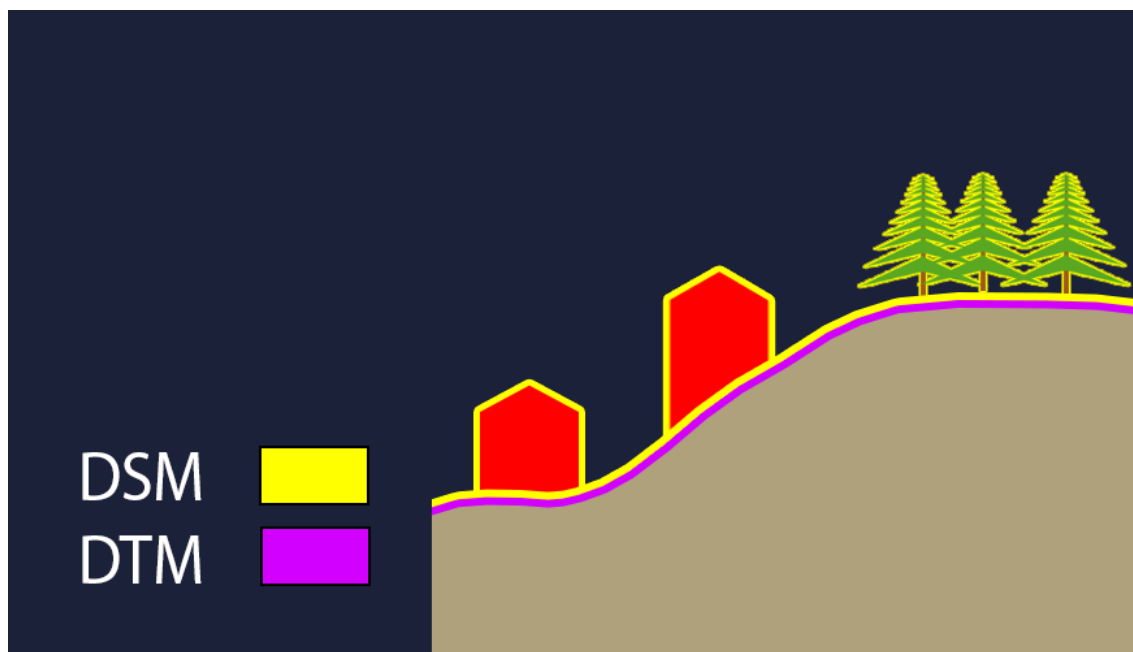
5.2 Paikkatietomallien valintakriteerit

Aineiston jatkokäsittelyssä käytettävä paikkatietomalli tulisi valita käyttökohteen ja aineistokohtaisten tietojen mukaan. Luokittelematon ja metatietoa sisältämätön XYZ-pistepilvi ei varsinaisesti sisällä tietoa pinnan topologiasta tai muodostettavan verkon tavoiteltavasta geometriasta, vaan mallinnuksessa käytettävän algoritmin on kyettävä muodostamaan malli ainoastaan pisteisiin sidotun koordinaattitiedon perusteella. Algoritmia valittaessa käyttäjän on selvitettävä ja ymmärrettävä aineiston kattavuus ja sen sisältämä mittaukseen liittyvä informaatio sekä mallintamiseen liittyvät valintaperusteet, joita voivat olla esimerkiksi valittavan algoritmin tehokkuus, prosessointiaika, lopputuloksen laatu ja täsmällisyys sekä käytettävissä olevat tiedostomuodot. Lisäksi valittavan algoritmin soveltuvuus eriluonteisten aineistojen, kuten pohjatopografian ja seinärakenteiden, prosessointiin on selvitettävä. [37, s. 14–15.]

5.3 Digitaalinen pinta-, maasto- ja korkeusmalli

Digitaalisilla malleilla tarkoitetaan pisteaineistosta tuotettuja matemaattisia vektori- tai ruutupohjaisia malleja. DSM-malli (DSM, Digital Surface Model) eli digitaalinen pinta-malli kuvaa maapintaa sekä sen päällä olevia kohteita, kuten rakennuksia ja kasvillisuutta. DSM-malleja käytetään esimerkiksi kaupunkisuunnittelussa ja metsänhoidossa.

DTM-malli (DTM, Digital Terrain Model) eli digitaalinen maastomalli esittää maanpinnan muodot (kuva 19). Siitä on poistettu maanpinnan kohteet, kuten rakennukset ja kasvillisuus. DTM-malliin viitataan toisinaan DEM-mallina (DEM, Digital Elevation Model) eli digitaalisena korkeusmallina. DTM- ja DEM-mallien määritelmät vaihtelevat maasta riippuen. DEM- ja DTM-malleja käytetään infra- ja vesisuunnittelussa, maaston eroosioprosessien mittauksessa, maaperäkartoituksissa sekä astrogeologiassa. Taipaleen kanavan pohja-aineiston mallinnus toteutettiin DTM-mallina. [38, s. 20; 39; 40; 41, s. 135.]



Kuva 19. DSM-malli (keltainen) kuvaa maanpintaa ja maanpäällisiä kohteita. DTM-malli (violetti) kuvaa vain maanpintaa. (Kuva: Pekka Helenius)

5.4 Pistepilvi

5.4.1 Pistepilven määritelmä

Pistepilvi on LiDAR-, SONAR- tai RADAR -menetelmällä yksittäisistä, kolmiulotteisessa avaruudessa koordinaatein määritellyistä pisteistä tuotettu pistekokoelma, jota käytetään kappaleen rakenteiden hahmottamiseen ja jäljentämiseen tietokonegraafisissa sovelluksissa. Pisteiden lukumäärä vaihtelee tuhansista miljooniin, riippuen keilatun kappaleen moniulotteisuudesta, käytetystä pistetiheydestä ja keilauksen laajuudesta [41, s. 45]. Taipaleen kanavasta insinööriyötä varten toimitettu aineisto oli kokonaisuudessaan pistepilvimuodossa niin vedenalaisen kuin vedenpäällistenkin aineiston osalta.

5.4.2 Pisteiden ominaisuudet

Kolmiulotteisten pistepilvien jokainen piste sisältää XYZ-koordinaattiarvon, joka määrittää pisteen paikan. XYZ-arvojen lisäksi pisteelle voidaan määritellä esimerkiksi RGB-väriarvo ja intensiteettiarvo. Pistepilven väriarvo määritetään tavallisesti yksiväriseksi, värjättyllä skalaariasteikolla tai ennestään yksittäisille pisteille määritetyillä RGB-arvoilla.

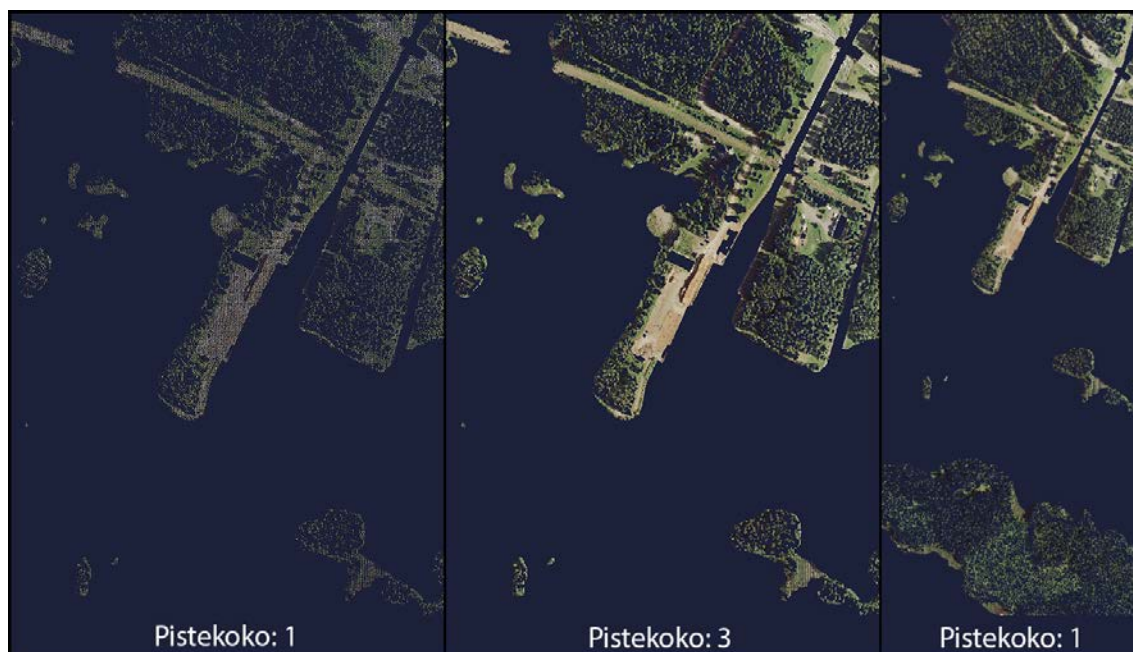
Pistetieto on tallennettu tavallisesti joko taulukkomuodossa tai pakatussa binäärimuodossa.

Pisteet voidaan paikkatieto-ohjelmissa renderöidä erimuotoisina, kuten pisteinä tai kuutioidena. Pisteille voidaan lisäksi määrittää renderöintikoko. Pisteille ei voida määrittää tekstuuripintaa eikä niissä voi käyttää varjostuksia puuttuvien normaalivektorien vuoksi. [41, s. 53.] Normaalivektorit voidaan laskea pistepilven jälkiprosessoinnissa. Normaalivektoreita ja tekstuureita käsitellään työssä vektorimallin yhteydessä.

5.4.3 Pisteiden visualisointi

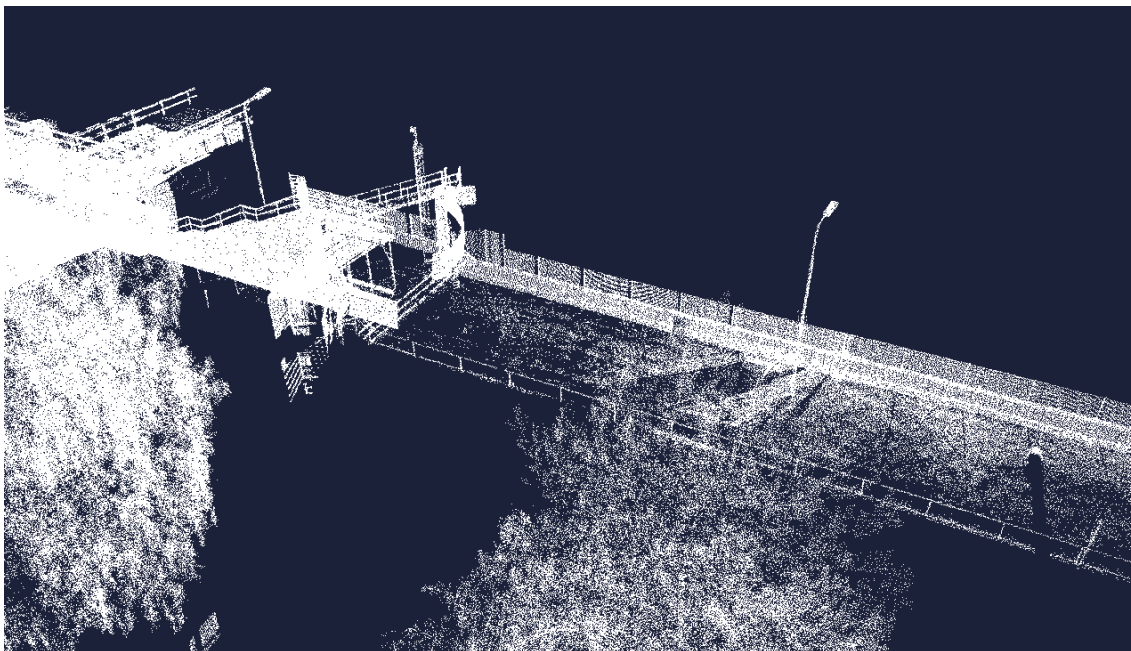
Useasta miljoonasta koostuvan pistepinnan visuaalinen eheys riippuu kahdesta tekijästä: katseluetäisyydestä ja pistekoosta. Mikäli katseluetäisyys on pistetiheyteen nähden liian pieni, näkyvät yksittäiset pisteet, visuaalinen muodon tunnistaminen vaikeutuu ja pistepinnan rakenne on visuaalisesti hajanainen. Suurempaa katseluetäisyyttä käyttäen pistemassan muodostama pinta näyttää eheämmältä, mutta yksityiskohtien erottaminen vaikeutuu (kuva 20).

Suurentamalla pistekokoa voidaan käyttää pienempää katseluetäisyyttä ilman pistemassan pintarakenteen merkittävää rikkoutumista. Suuremman pistekoon seurauksena yksityiskohtien tulkitseminen kuitenkin vaikeutuu ja yksittäiset pisteet saattavat esiintyä päällekkäin toistensa suhteen.



Kuva 20. Maanmittauslaitoksen ALS-mittauksella tuotettua RGB-värjättyä laserkeilausaineistoa Taipaleen kanavan alueelta. Pistekokoalla 1 aineisto näyttää läheltä katsottuna hajanaiselta. Pistekokoalla 3 aineisto näyttää eheältä. Pistekokoalla 1 saavutetaan pistekoon 3 eheys vain, mikäli aluetta tarkastellaan kauempaa, eli pisteet renderöidään toistensa viereen niin, ettei niiden ympärille jää tyhjää tilaa. (Kuva: Pekka Helenius)

Moniulotteisia pintoja sisältävien kappaleiden osalta pistepilvien renderöinti voi olla ongelmallista, koska pintojen rakenne ei pistepilvimuodossa ole täysin tiivis. Tämä aiheuttaa takana olevien pintojen näkymisen edessä olevien pintojen läpi, mikä on visuaalisesti ongelmallista ja hankaloittaa pistetiedon tulkitsemista (kuva 21). Ongelmaa voidaan vähentää joko rajaamalla näkyvää pisteaineistoa, järjestämällä pisteaineisto visuaalisuuden suhteen hierarkkisesti tai muodostamalla pisteaineistosta tiivisrakenteisen monikulmioverkon. [41, s. 53–55.] Monikulmioverkko rakenteineen käsitellään työssä vektorimallin yhteydessä.



Kuva 21. Pistepilven läpinäkyvyys ja yksivärisyys vaikeuttavat aineiston sisältämien kohteiden muototulkintaa. Kuvassa Taipaleen kanavan itäpuolen laserkeilausaineistoa. (Kuva: Pekka Helenius)

5.4.4 Pisteiden luokittelu

Laserkeilausaineiston pisteet luokitellaan yleisesti LAS-tiedostoformaatin määrittelemällä standardilla. Standardin mukaiset pisteiden luokitteluarvot on esitetty oheisessa taulukossa 1:

Taulukko 1. LAS-tiedostoformaatin mukaiset luokitteluarvot laserkeilauspisteille [42, s. 8].

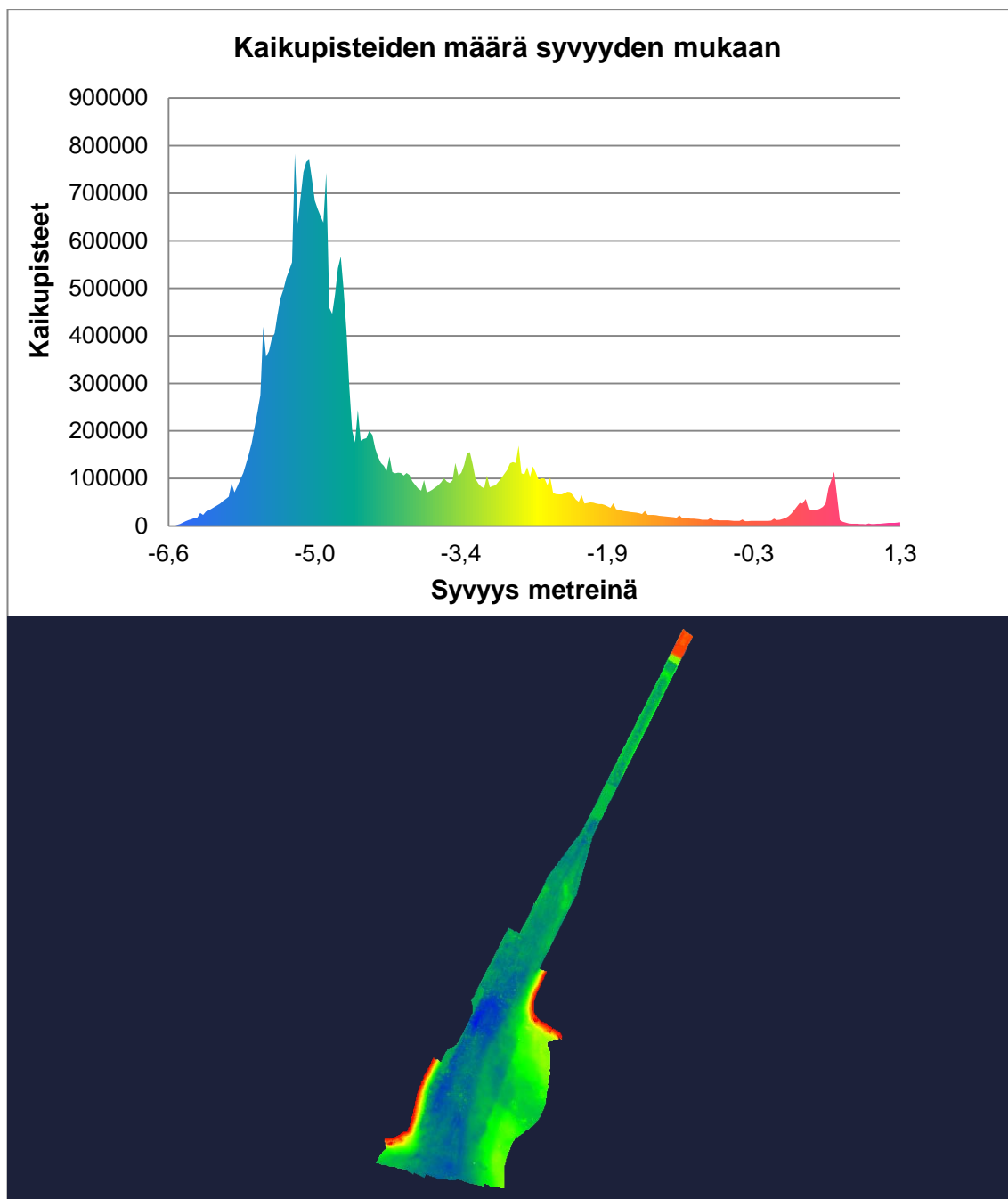
Luokitteluarvo	Selitelmä	Selitelmä (eng.)
0	Luotu, ei luokiteltu*	Created, never classified*
1	Luokittelematon*	Unclassified*
2	Maanpinta	Ground
3	Matala kasvillisuus	Low Vegetation
4	Keskikorkea kasvillisuus	Medium Vegetation
5	Korkea kasvillisuus	High Vegetation
6	Rakennus	Building
7	Alapiste (kohina)	Low Point (noise)
8	Mallin solmupiste (painopiste)	Model Key-point (mass point)
9	Vedenpinta	Water
10	Varattu ASPRS:n kuvaukselle	Reserved for ASPRS Definition
11	Varattu ASPRS:n kuvaukselle	Reserved for ASPRS Definition

12	Päällekkäiset pisteet	Overlap Points
13-31	Varattu ASPRS:n kuvaukselle	Reserved for ASPRS Definition
* LAS-formaatti käyttää molempia lukuarvoja formaatin yhteensopivuuden takaamiseksi eri ohjelmistojen kanssa		
ASPRS = American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (suom. Amerikkalainen fotogrammetrian ja kaukokartoituksen seura)		

Vedenalainen kaikupisteaineisto luokitellaan eri vedenalaisten rakenteiden ja ominaisuuksien sekä aineiston laadun mukaan. Vedenalainen aineisto ei sellaisenaan noudatta LAS-tiedostoformaatin luokittelustandardia, mutta kaikupisteaineiston luokittelussa ja arvioinnissa voidaan kuitenkin käyttää pisteiden intensiteettiin ja laatuun sidottua tietoa. [17, s. 25.]

5.4.5 Taipaleen kanavan pohja-aineisto

Taipaleen kanavasta mitattu pohja-aineisto sisältää hieman alle 31 miljoonaa kaikupistettä noin 3,90 hehtaarin kokoisella mittausalueella. Pohja-aineiston alin korkeusarvo on 6,61 metriä alavesistön vedenpinnan korkeusreferenssin alapuolella, ja ylin 1,30 metriä sen yläpuolella. Näin ollen aineiston korkeusväli on 7,91 metriä. Vedenpinnan taso määrittää pohjasta mitatun kaikupisteaineiston teoreettisen ylärajan. Oheisessa kaaviossa 2 on esitetty Taipaleen kanavan pohjasta tuotetun kaikupisteaineiston määrällistä jakaumaa korkeuden mukaan:

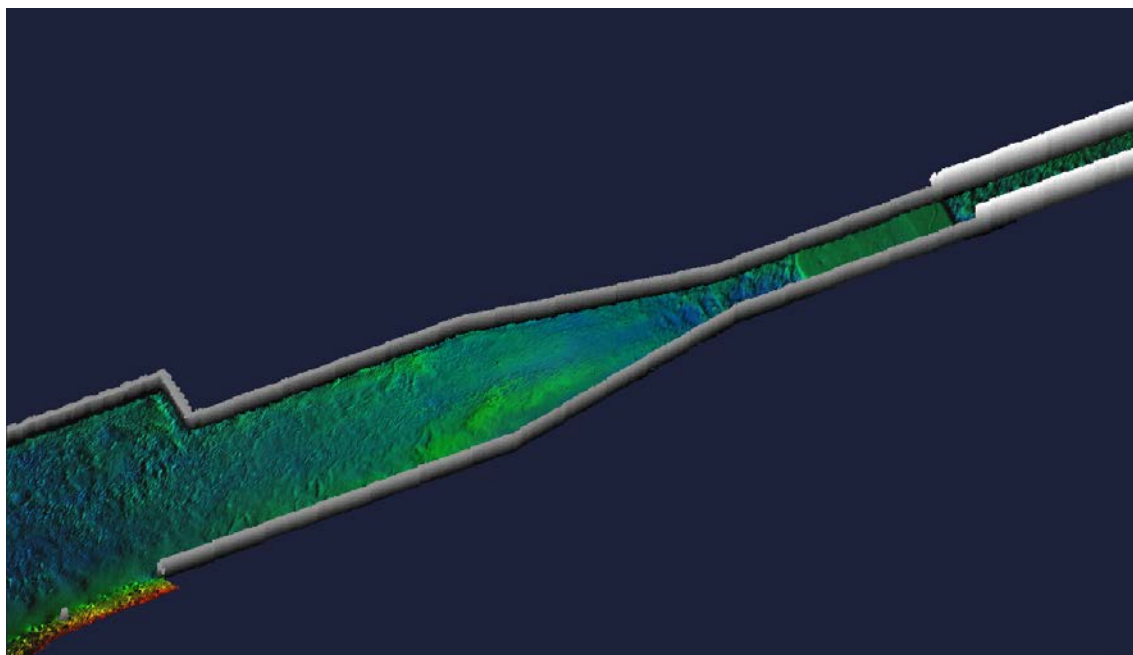


Kaavio 2. Taipaleen kanavan pohjan kaikupisteaineiston määrällinen jakauma syvyyden mukaan. Pohjan syvimmät kohdat on esitetty sinisellä, matalimmat punaisella. Pisteitä on yhteensä 30 887 314.

5.4.6 Taipaleen kanavan vedenalaiset seinät

Taipaleen kanavan vedenalaisista seinistä mitattu kaikupisteaineisto kattaa kanavan seinät kokonaisuudessaan ylä- ja alavesistön puolelta (kuva 22). Aineisto sisältää noin

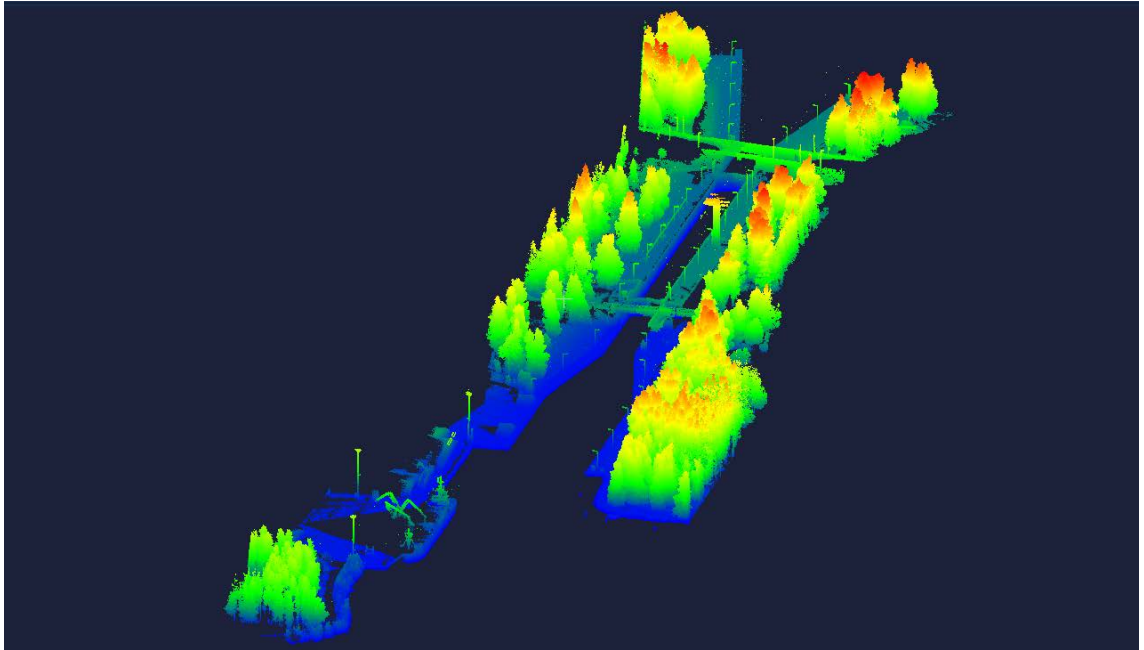
12 miljoonaa kaikupistettä. Alin korkeusarvo on 5,71 metriä alavesistön vedenpinnan korkeusreferenssin alapuolella ja ylin 6,09 metriä sen yläpuolella. Näin ollen aineiston korkeusväli on 11,80 metriä. Kanavan ylävesistön vedenpinta on korkeustasolla 6,09 metriä mittausaineiston sisäistä korkeusreferenssiä käyttäen. Vedenpinnan taso määrittää seinistä mitatun kaikupisteaineiston ylärajan.



Kuva 22. Taipaleen kanavan vedenalaisista seinistä mitatut kaikupisteet on värjätty valkoisella. Etualalla sijaitsee kanavan itäpuoleinen seinä, taka-alalla länsipuoleinen seinä. Kanavan pohjoispuoli sijaitsee oikealla. (Kuva: Pekka Helenius)

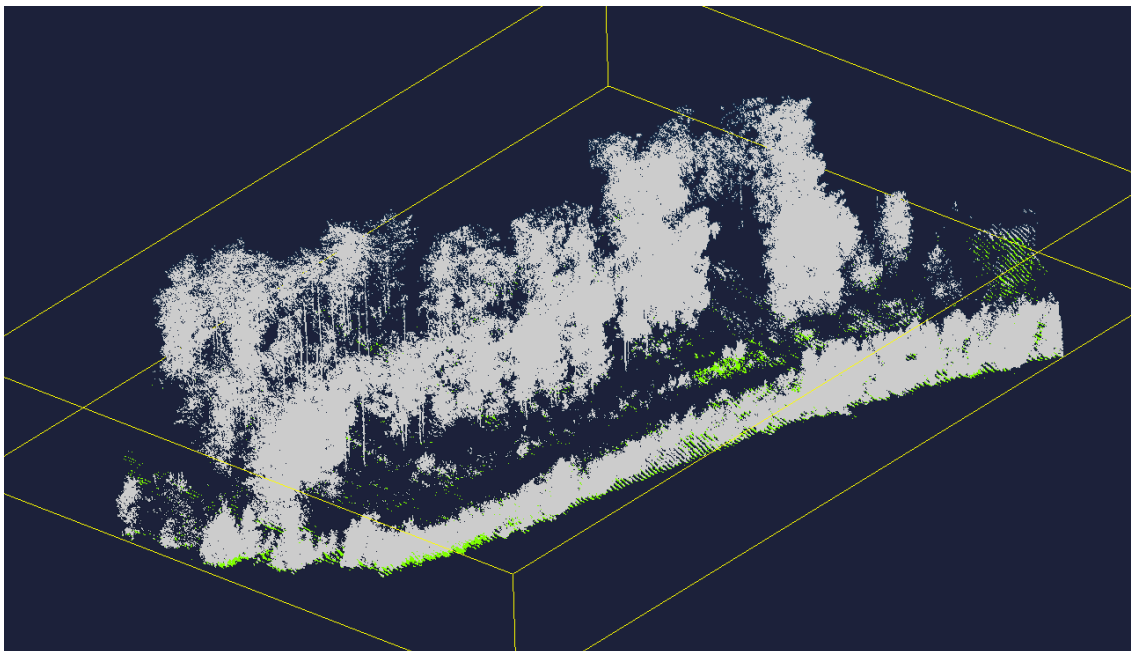
5.4.7 Taipaleen kanavan vedenpäällinen pisteaineisto

Kanavan vedenpäällinen pisteaineisto on tuotettu laserkeilaintekniikalla mittausaluksesta käsin, ja se sisältää noin 37 miljoonaa luokittelematonta laserkeilauspistettä. Aineiston alimmat pisteet sijaitsevat vesirajassa (kuva 23).

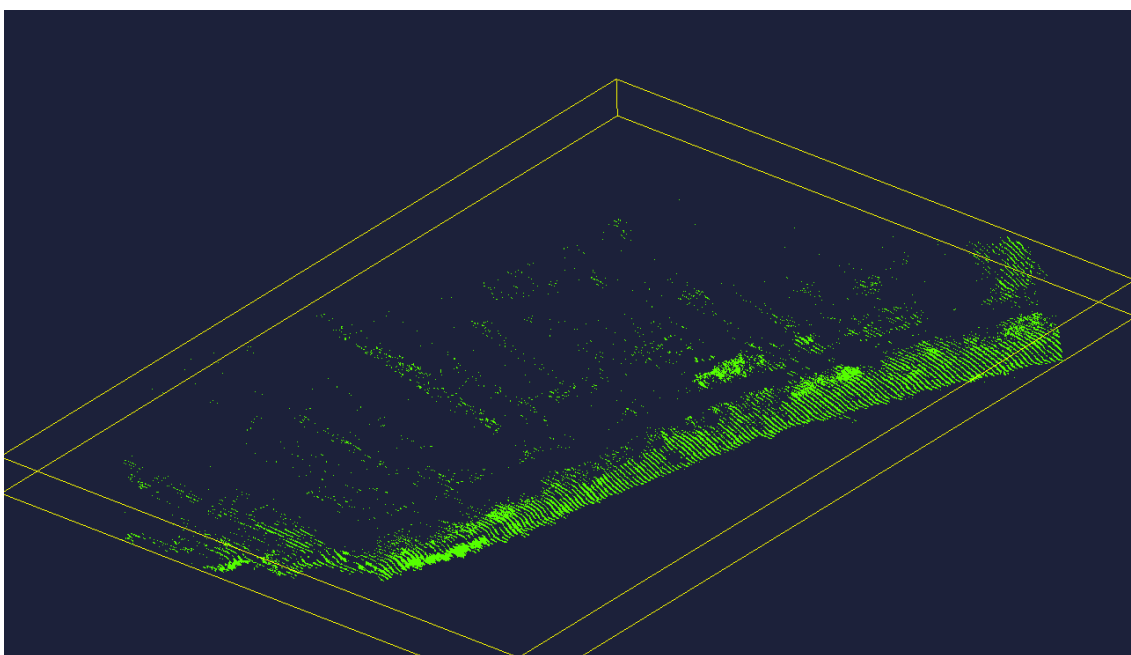


Kuva 23. Taipaleen kanavan vedenpäällinen laserkeilainaineisto värjättyä pisteiden korkeusarvojen mukaan. (Kuva: Pekka Helenius)

Kanavan vedenpäälliset laserkeilauspisteet luokiteltiin kolmeen luokkaan: maanpintaan, kasvillisuuteen ja muihin pisteisiin, joita olivat erinäiset rakennelmat, kuten pylvää, portaat, tornit ja aidat. Pisteet erotettiin toisistaan manuaalisia rajausmenetelmiä ja automaattisia pisteenluokittelualgoritmeja käyttäen (kuvat 24 ja 25).



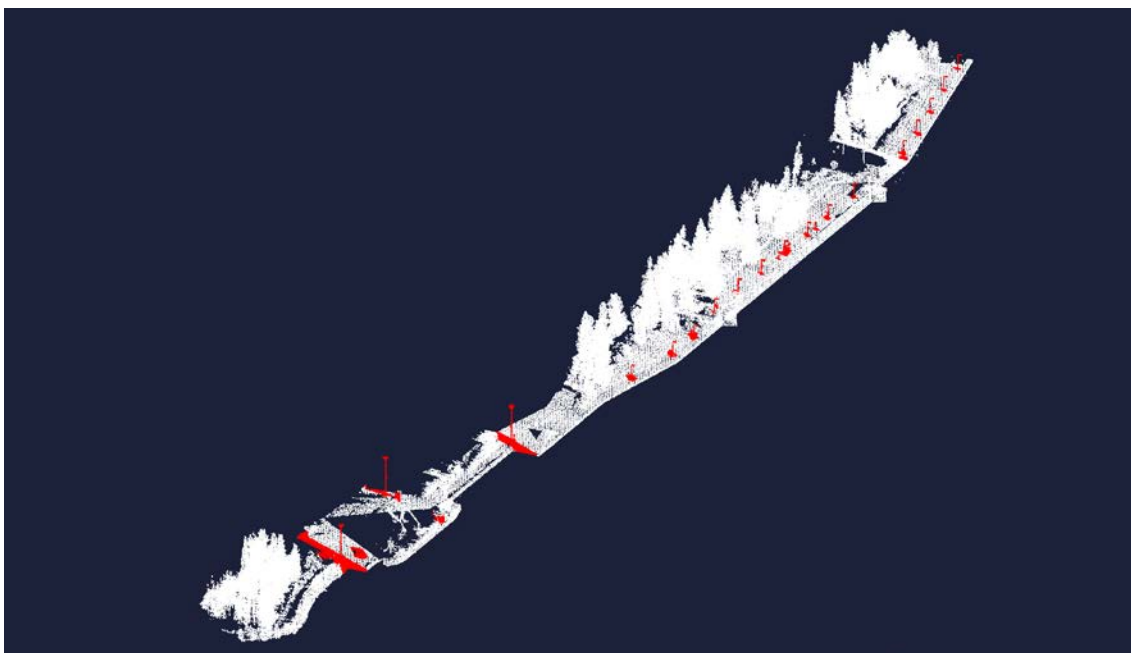
Kuva 24. Vedenpäällinen laserkeilausaineisto luokiteltiin pistetyyppien mukaan. Kuvassa harmaalla esitetty kasvillisuus on erotettu vihreistä maanpinnan pisteistä erilliseksi pistetasoksi. (Kuva: Pekka Helenius)



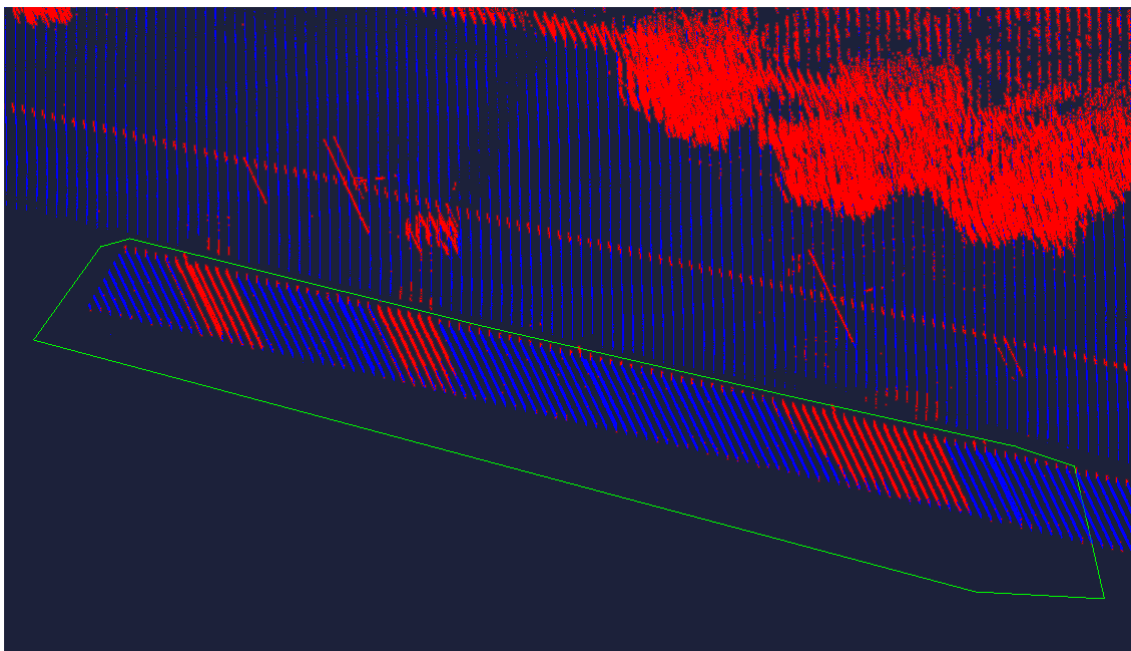
Kuva 25. Kuvassa kasvillisuus on poistettu, ja maanpinnan pisteet on jätetty jäljelle. Kasvillisuus aiheuttaa maanpinnan aineistoon laajoja katvealueita. (Kuva: Pekka Helenius)

Taipaleen kanavan vedenpäällisen aineiston luokittelussa havaittiin käytettyjen luokittelualgoritmien tuottavan väärintulkintoja maastossa sijaitsevien pienkohteiden osalta.

Tämän vuoksi kappaleita esittävän pistemassan luokittelussa turvauduttiin myös manuaalisiin prosessointimenetelmiin (kuvat 26 ja 27).

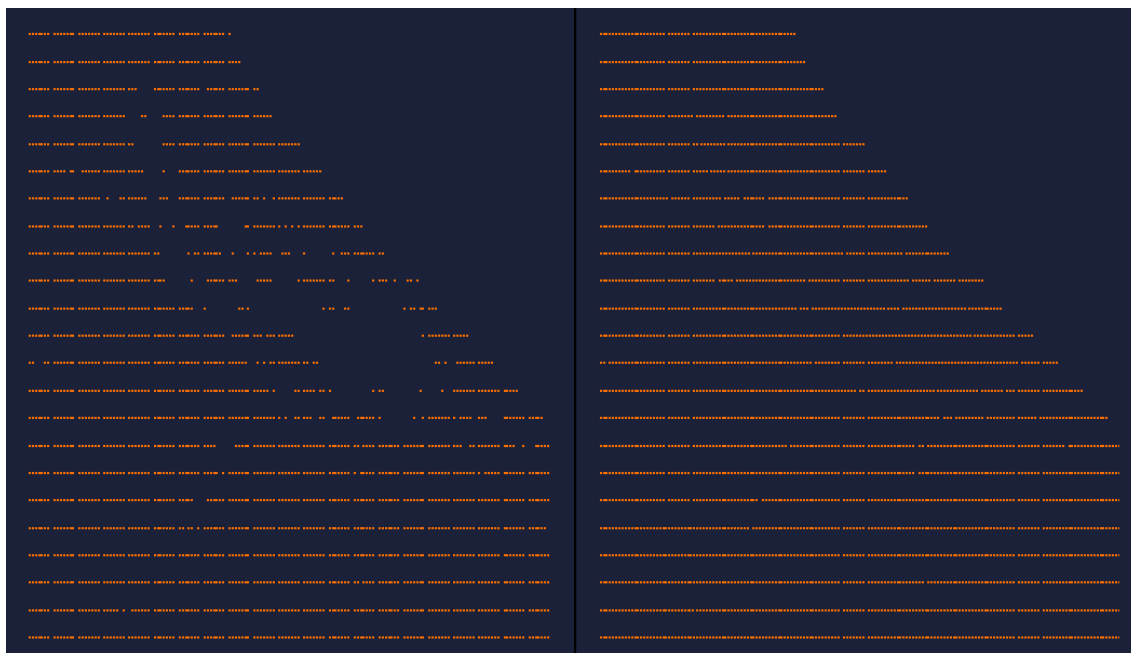


Kuva 26. Taipaleen kanavan laserkeilausaineiston tolpparakenteet eroteltiin muusta aineistosta (punaisella). Erotus toteutettiin osittain manuaalisesti. (Kuva: Pekka Helenius)



Kuva 27. Vaikka luokittelualgoritmit helpottavat maanpinnan pisteiden erottelua, eivät ne kykene tulkitsemaan aineistoa kaikkien pisteiden osalta oikein. Kuvassa algoritmi on määritellyt kanavan seinäaineistoa sekä maanpinnan (sinisellä) että kasvillisuuden (punaisella) pisteisiin. (Kuva: Pekka Helenius)

Kasvillisuuden ja kanavan länsipuolella sijainneen ison aluksen aiheuttamien katvealuiden vuoksi jotkin maanpinnan alueet ovat vailla pisteitä. Pisteaineiston kattavuudella on vaikutusta siitä tuotetun ruutu- tai vektorimallin rakenteeseen. Katveisien alueiden osalta pisteaineistoa voidaan inter- ja ekstrapoloida, eli tyhjiä kohtia täydennetään laskennallisesti tuotetulla, tihennetyllä pistemassalla (kuva 28).



Kuva 28. Interpoloimaton pistejoukko vasemmalla, interpoloitu pistejoukko oikealla. (Kuva: Pekka Helenius)

Interpolointi tarkoittaa arvojen tuottamista arvojoukon väliin, ekstrapoloinnissa arvoja tuotetaan arvojoukon ulkopuolelle. Lineaarisisessa inter- ja ekstrapoloinnissa tuotettujen arvojen välisen muutoksen oletetaan olevan tasainen, minkä vuoksi täyttöalueen laajuus ja topologian epätasaisuus eli epälineaarisuus voi aiheuttaa epätarkkuuksia keino-tekoisesti tuotettujen pisteiden sijaintitietoon, mikäli tihennystä suoritetaan iteratiivisesti useita kertoja peräkkäin. [43, s. 33; 44.]

Laskennallisten täydennysmenetelmien lisäksi pisteaineistoa voitaisiin täydentää joko ALS- tai TLS-mittauksilla. Maastossa mitattu lisäaineisto takaisi mittatarkkuuden säilyvyyden paikoissa, jotka ovat alkuperäisessä mittauksessa olleet katveisia. Lisämittaukset kasvattaisivat toisaalta mittausprosessiin käytettyä kokonaisaikaa.

5.5 Vektorimalli

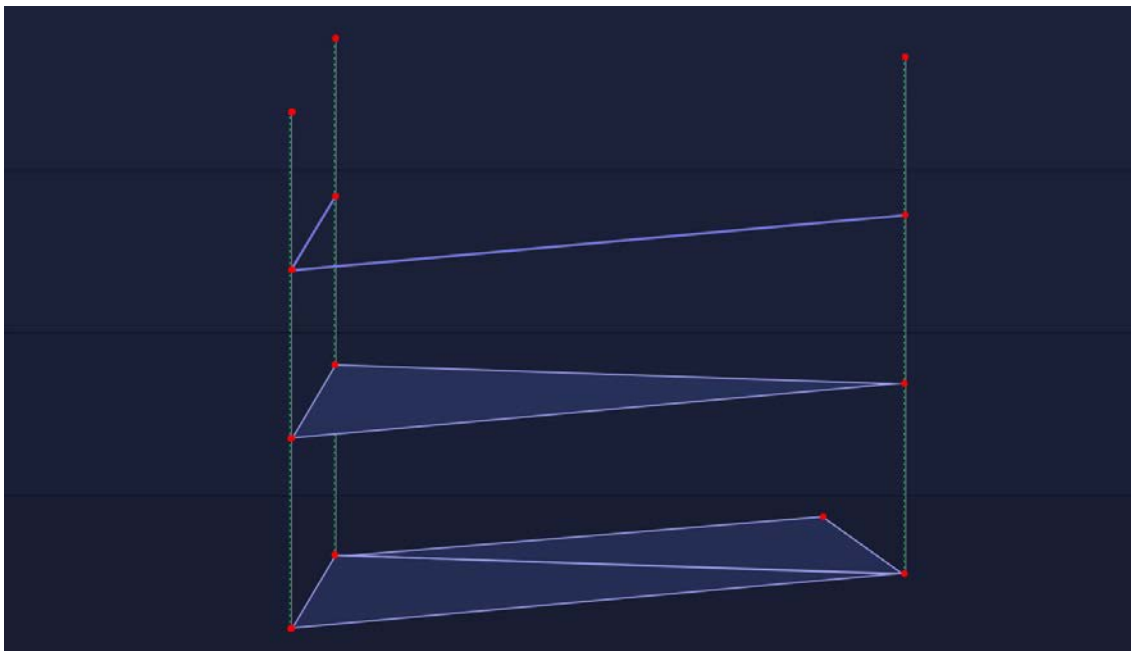
5.5.1 Rakenne

Vektorimalli on vektoroituun aineistoon perustuva paikkatietomalli, joka koostuu pisteistä, viivoista, viivojen sulkemista alueista. Vektorimallin elementtien keskinäinen sijainti on suhteellisesti määritelty, ja ne voivat sijaita toistensa suhteen olla epäsäännöllisesti. Malli on luonteeltaan skaalautuva, minkä vuoksi siinä esitetyn tiedon tarkkuus ei kärsi mittakaavan muuttuessa. Vektorimuotoon tallennettava tieto sisältää vähimmillään vain koordinaatti- ja viivatietoja. [36, s. 31, 33; 45, s. 1; 46.]

5.5.2 Epäsäännöllinen kolmioverkko

Pistepilvestä tuotetusta vektorimallista voidaan muodostaa epäsäännöllinen kolmioverkko (TIN, Triangulated Irregular Network) [47]. Kolmioverkko sisältää

- pisteitä. Kolmiulotteisessa avaruudessa piste on XYZ-koordinaateiltaan tunnettu abstrakti piste. Geometrisessa avaruudessa piste tunnetaan kärkipisteenä (Vertex, mon. Vertices), topologisessa avaruudessa solmupisteenä (Node).
- murtoviivoja (Polyline). Murtoviiva on yhtenäinen viivaelementti, joka koostuu yhdestä tai useammasta janaista ja janoja yhdistävistä pisteistä.
- särmiä (Edge). Särmiä on kaksi solmupistettä yhdistävä yksiulotteinen topologinen viivaelementti.
- monikulmioita (Polygon). Monikulmio on vähintään kolmen, ei samalla suoralla sijaitsevan pisteen kautta kulkeva, yhtenäisen ja itseään leikkaamattoman murtoviivan sulkema tasoelementti. Monikulmio on yksinkertaisin geometrinen pinta-alaltaan määritelty rakenne, minkä takia sitä käytetään perusyksikkönä pintaa kuvaavissa esityksissä (kuva 29).
- pintoja (Face). Tahko on monikulmion muodon mukainen kaksiulotteinen topologinen taso tai pinta. Geometrisessa avaruudessa tunnetaan myös tahkona.



Kuva 29. Monikulmion rakenne. Monikulmio koostuu pisteistä (punaisella), jotka linkittyvät toisiinsa murtoviivoilla (sininen viivoitus). Murtoviivat muodostavat pinnoitettuja monikulmioita (sininen pinnoitus), jotka voidaan linkittää toisiinsa. Toisiinsa linkitetty monikulmiot muodostavat yhtenäisen verkkorakenteen. (Kuva: Pekka Helenius)

Toisiinsa solmupisteillä sidoksissa olevia, vierekkäisten ja toisiaan leikkaamattomien monikulmioiden muodostamaa eheää rakennetta kutsutaan monikulmioverkoksi (Polygonal Mesh). [37, s. 5; 48, s. 62; 49; 50, s. 473.]

Monikulmioverkkojen lisäksi rakenteita voidaan kuvata myös matemaattisiin funktioihin perustuvilla Beziér- tai NURBS-pinnoilla, joiden etu on pienessä koossa ja tarkkuudessa. Niiden käyttö on kuitenkin hyvin rajoittunutta, koska useimmat sovellukset eivät kykene esittämään suoraan säännöllisenä funktiona kuvattua pintaa, vaan edellyttävät pintarakenteesta jonkinlaista approksimaatiota, kuten monikulmioverkkoa. [37, s. 4.]

5.5.3 Monikulmioverkon tarkkuus

Automaattisesti luodun monikulmioverkon lähteenä käytetty pisteaineisto on tuotettu mittaamalla kohteesta määrällisesti rajallinen joukko näytteitä eli pisteitä mittauslaitteistolla, jolla on rajoittunut mittaustarkkuus [37, s. 4]. Kohteesta tuotettu pisteaineisto on näin ollen jo lähtökohtaisesti häviöllistä.

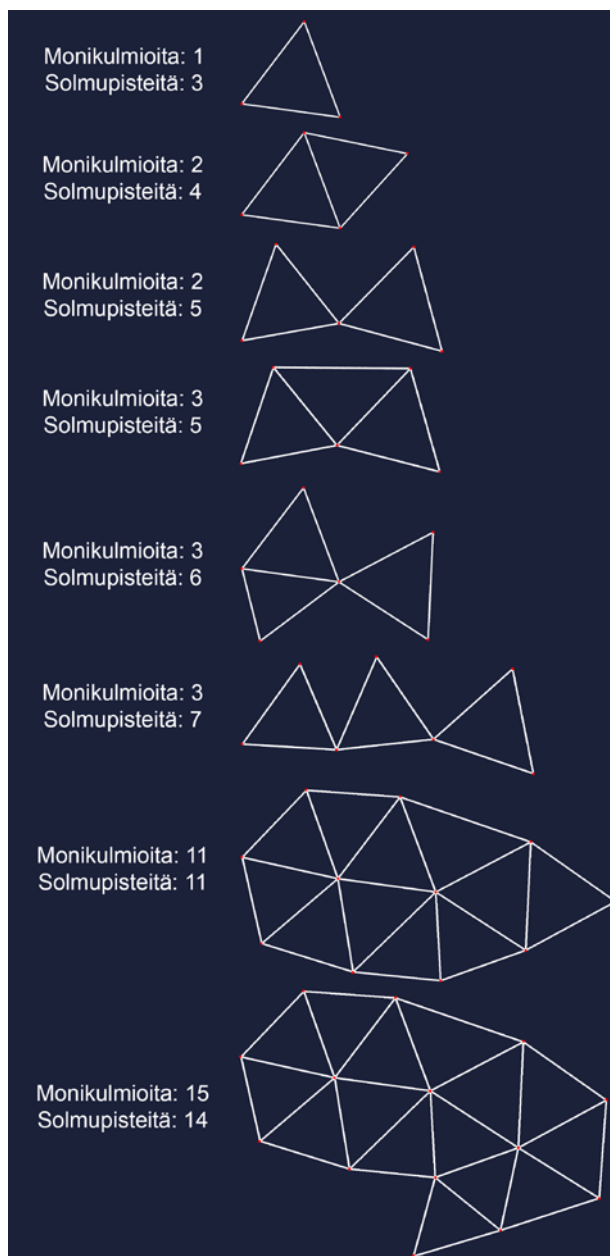
Pisteaineiston häviöllisyyden sekä monikulmioiden tasorakenteen vuoksi monikulmioverkko kuvaa pintarakennetta harvoin tarkasti, varsinkaan kaarevien pintojen tapauksessa. Monikulmioiden määrän lisäämisellä voidaan kaarevasta pinnasta tuotetun mallin tarkkuutta parantaa, mutta näin tuotettu malli ei ole koskaan tarkka esitys alkuperäisestä pinnasta. [37, s. 4.]

Monikulmioverkon pisteiden ja monikulmioiden määrän lisääntyessä tietokoneen käyttämän muistin ja prosessointitehon tarve kasvaa, mikä asettaa rajat esitettävän verkon monimutkaisuudelle. Yksityiskohtien kasvaessa äärettömäksi tietokoneen prosessointiteho ei riittäisi, minkä vuoksi monikulmioverkko on aina epätäsmällinen esitys eli approksimaatio reaali maailman esikuvastaan. Sen tarkkuus riippuu kuvattavasta kappaleesta sekä monikulmioiden määrästä ja koosta. [37, s. 4; 50, s. 471–472.]

Monikulmioverkon tuottamista varten lähtöaineistoa käytännössä karsitaan, koska kulkuluotain- tai laserkeilaustekniikalla tuotetun pistepilven pistetiheys on prosessointiin käytettävään aikaan ja laskentakapasiteettiin nähden suuri ja koska kaikkien lähtöaineiston pisteiden käyttö sellaisenaan tuottaisi erittäin raskaan mallin. Pisteaineiston karsiminen vaikuttaa verkon rakenteeseen, yksityiskohtien määrään ja tiedostokokoon, mikä täytyy ottaa huomioon aineiston prosessointivaiheessa luotavalle mallille asetettujen tavoitteiden mukaisesti.

5.5.4 Monikulmioiden ja solmupisteiden määrä

Monikulmioverkon solmupisteiden ja monikulmioiden määrä riippuu verkon rakenteen eheydestä ja rakenteiden määrästä. Monikulmioiden lukumäärän kasvaessa solmupisteiden määrä kasvaa. Monimutkaisissa ja yhtenäisissä verkkorakenteissa monikulmioita voi olla solmupisteitä enemmän (kuva 30).

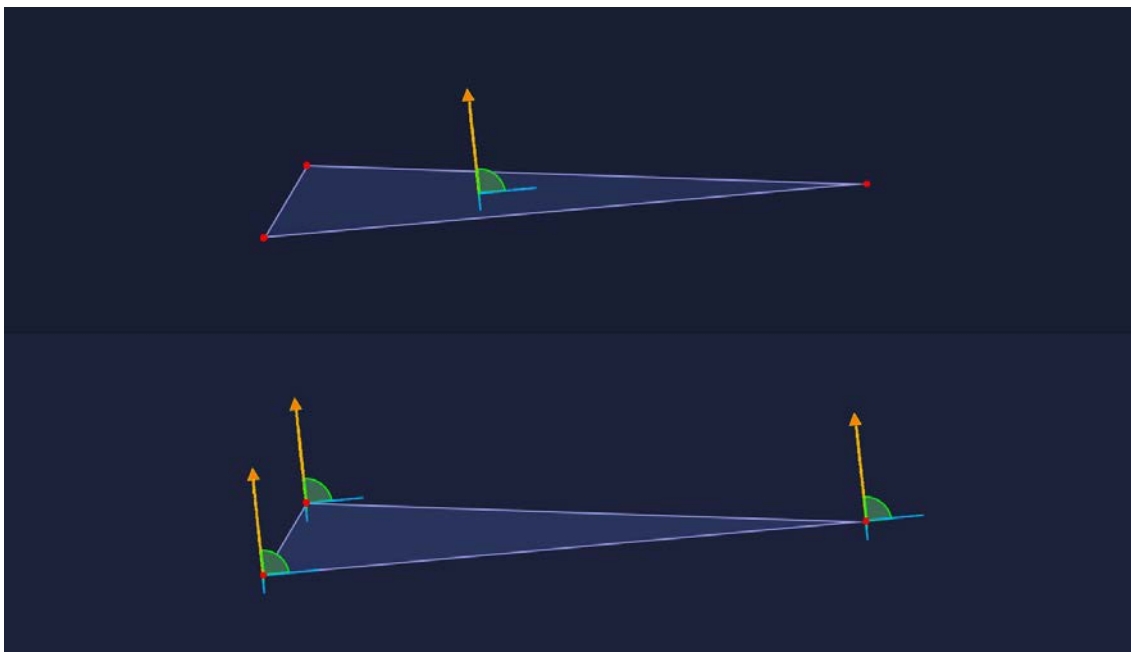


Kuva 30. Monikulmioverkon eheys ja rakenteiden määrä vaikuttavat monikulmioiden ja solmupisteiden määrään. Muodostetussa verkossa voi olla enemmän monikulmioita kuin solmupisteitä. (Kuva: Pekka Helenius)

5.5.5 Monikulmioverkon normaalivektorit

Normaalivektoreilla kuvataan geometriassa kahden suoran tai kappaleen pintojen keskinäistä kohtisuoruutta. Pinnan normaali (Surface Normal) on tangenttitasoa tai monikulmiota vasten kohtisuorassa oleva suuntavektori, eli sen suunta on kohtisuoraan pois päin pinnasta (kuva 31). [51; 52, s. 111.]

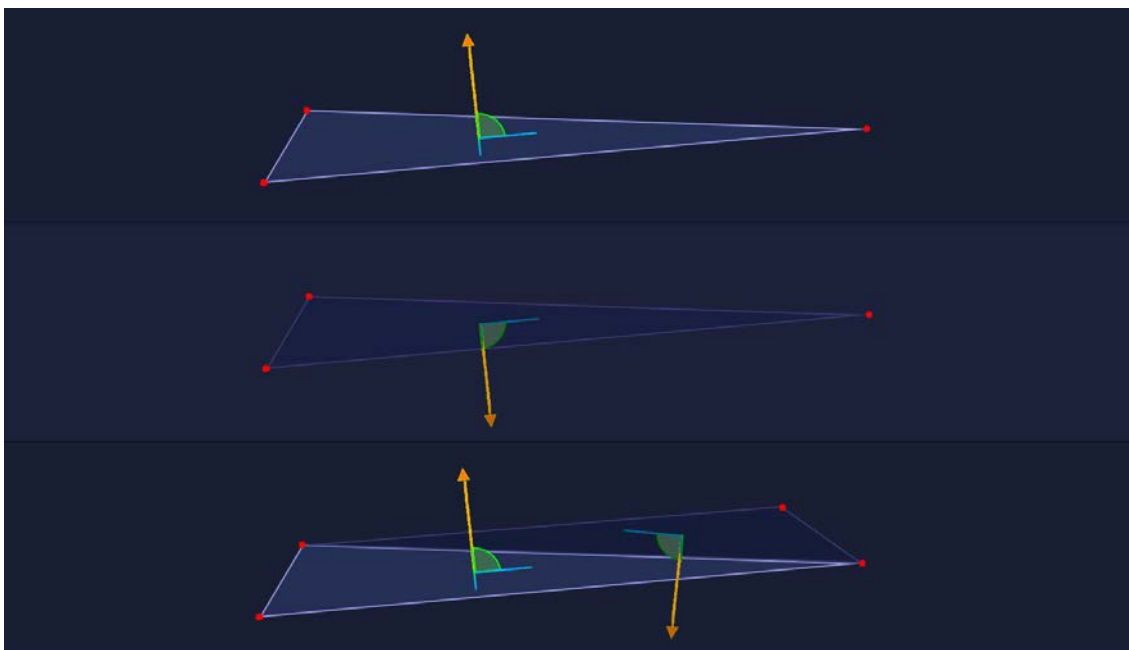
Pinnan normaalin lisäksi myös yksittäisille pisteille voidaan esittää suuntavektori, eli pisteen normaali (Vertex Normal). Koska yksittäinen piste muodostaisi kuitenkin sellaiseen suunnaltaan määrittelemättömän nollavektorin, voidaan pisteen normaali muodostaa laskennallisesti käyttäen vierekkäisten pintojen normaaleista interpoloitua arvoa. [49.] Mikäli geometrisessa avaruudessa määritelty kappale muodostuu vain yhdestä pisteestä, ei sille voida laskea suuntavektoria.



Kuva 31. Normaalivektorit. Monikulmion pinnan normaalivektori ylhäällä ja pisteille lasketut samansuuntaiset normaalivektorit alhaalla. (Kuva: Pekka Helenius)

Pinnan normaali määrittää monikulmion pinnan näkyvyyden tietokonegraafisissa soveluksissa. Monikulmion pinta on kaksipuolinen: etupinta (Front Face) on pinnan normaalin puoleinen pinta ja takapinta (Back Face) taas pinnan normaalin vastainen pinta. Pinnan normaalin suunta siis määrää, kumpi pinnoista on etupinta ja kumpi takapinta. [53.]

Monikulmion etupinta sisältää tietoa pinnan materiaaliomaisuuksista, kuten pintatekstuurista. Takapinta esitetään graafisesti usein joko mustana tai tummempana kuin etupinta (kuva 32). Jotkin tietokoneohjelmat tukevat monikulmion pinnan esittämistä kaksipuoleisena (Double Sided Faces), jolloin monikulmion takapinnalle projisoidaan sama tieto kuin etupinnalle [54].

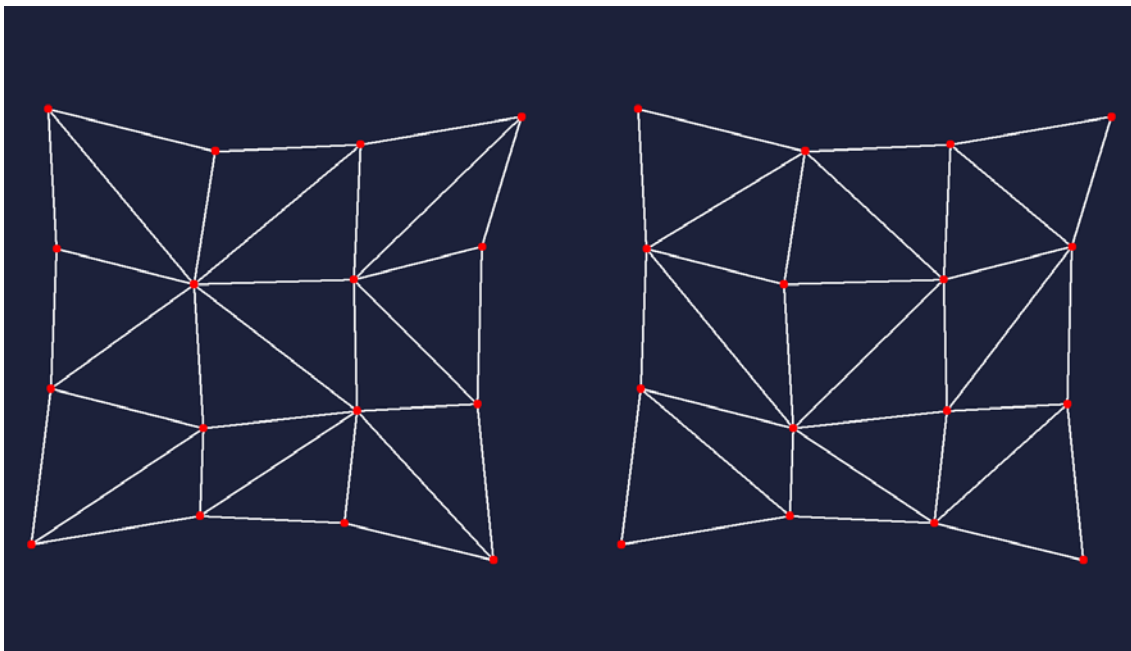


Kuva 32. Normaalivektorien vaikutus monikulmioiden esittämiseen. Katselukulmaan nähden poispäin osoittavien normaalivektorien mukaiset monikulmioiden pinnat esitetään usein tummempana tietokonegraafisissa, kolmiulotteista aineistoa esittävissä sovelluksissa. (Kuva: Pekka Helenius)

Monikulmioverkon muodostamisessa tulee huomioida yksittäisten monikulmioiden pintojen normaalivektoreiden suunta, sillä väärinpäin muodostetut monikulmiokohtaiset pinnan normaalit vaikuttavat aineiston visuaaliseen eheyteen ja siten muun muassa teksturoinnin laatuun. Pinnan normaalin suunta määritetään paikkatieto-ohjelmiin sisällytetyillä automaattisilla tai manuaalisilla prosessointityökaluilla. Normaalivektoreiden suunnalla ei ole vaikutusta monikulmioverkon muotoon, mutta valaistuksen ja varjostuksen kannalta pinnan normaalivektoreiden suunnalla on väliä [37, s. 8].

5.5.6 Monikulmioverkon diagonaalit

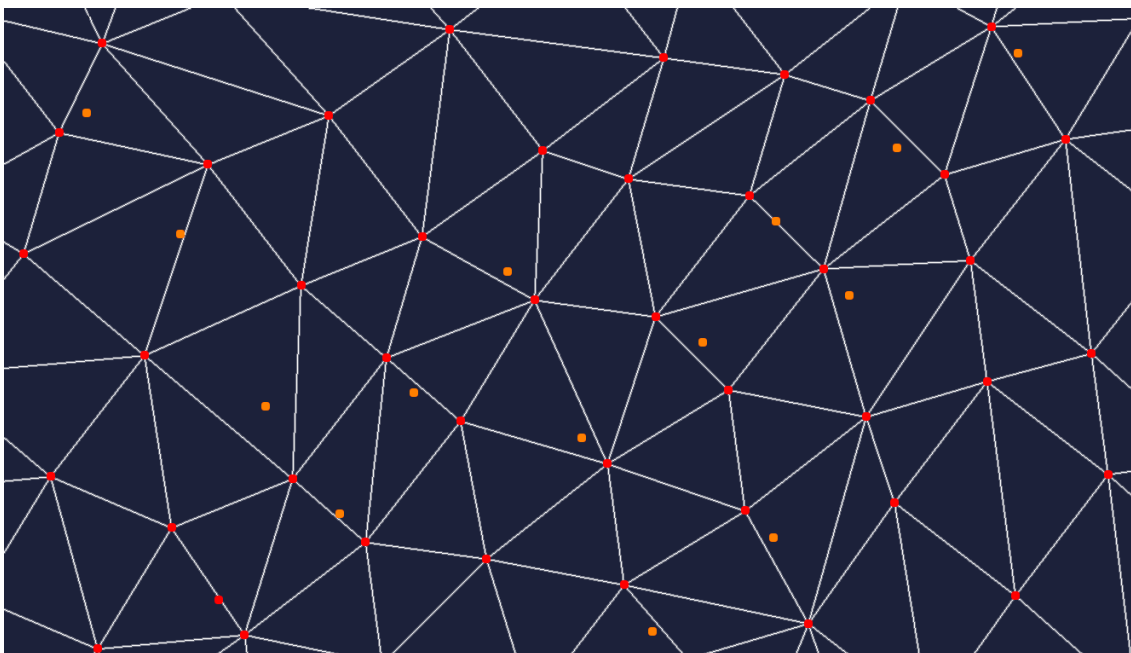
Diagonaaleilla tarkoitetaan kahden monikulmion solmupisteiden välille muodostettavia lävistäjiä, jotka eivät linkity viereisiin solmupisteisiin. Monikulmiot voidaan muodostaa usealla eri tavalla eli diagonaalisen muunnoksen avulla, mikä vaikuttaa verkon topologiaan (kuva 33). [43, s. 28–29; 55.]



Kuva 33. Kaksi monikulmioverkkoa, joissa on samat solmupisteet, mutta eri diagonaalit. (Kuva: Pekka Helenius)

5.5.7 Kolmiointi ja monikulmioverkon rakenteen tarkkuus

Kolmiointi (Triangulation) on alkuperäisen kappaleen tai pinnan muodon mallintamista kolmioilla ja niistä rakentuvalla monikulmioverkolla [37, s. 6]. Rakenteellisesti oikean monikulmioverkon tuottaminen edellyttää oikeanlaista tulkintaa mallinnettavan kappaleen profiilista. Tulkinta on ongelmallista kohdissa, joissa kolmiointi voidaan toteuttaa useamman vaihtoehdoisen solmupisteen avulla. Solmupisteiden valinnalla on vaikutusta monikulmioverkon rakenteeseen ja siten myös siihen, kuinka verkko asettuu alkupe-
räiseen lähtöaineistoon nähden (kuva 34).

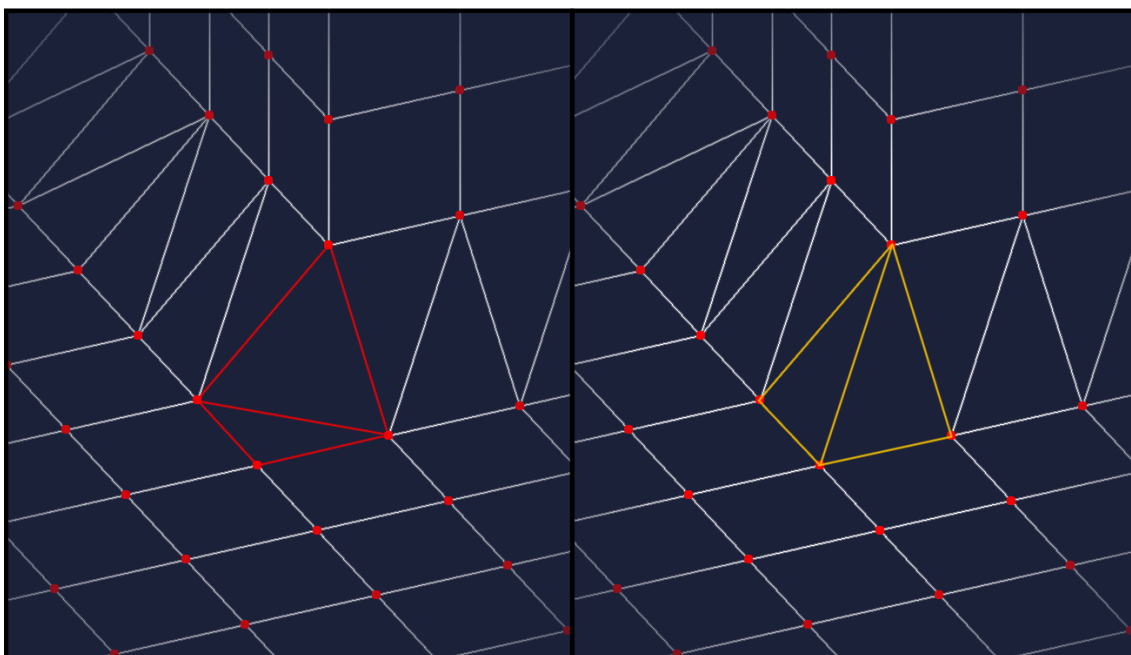


Kuva 34. Monikulmioverkossa ei voida käyttää kaikkia alkuperäisen pisteaineiston pisteitä verkon solmupisteinä. Oranssilla esitetyt pisteet on monikulmioverkon muodostuksessa jätetty pois. (Kuva: Pekka Helenius)

Monikulmioverkko on rakenteeltaan yksinkertainen tai monimutkainen. Tiheä solmupisteistö tuottaa tarkempia, mutta raskaampia malleja. Tiheää solmupisteistöä tulisi käyttää alueilla, joilla tapahtuu useita epälineaarisia, topologisia muutoksia. Monimutkaisia maaston muotoja kuvaava topografinen DTM-malli voi edellyttää tiheimmän solmupisteistön ja monikulmioverkon käyttöä, kun taas tasaiset seinät ja tasot voidaan kappaleen topologisesta profiilista ja profiilin muutoksista riippuen esittää harvemmalla verkkorakenteella. [43, s. 32.]

Automaattisten monikulmioverkon muodostusmenetelmien eräs ongelma on verkon tasalaatuisuuden kärsiminen, eli menetelmät voivat tuottaa alueittain huonolaatuisia monikulmioita tai pistejoukkoon nähden väärentyyppisiä monikulmioelementtejä (kuva 35). Ongelma voi johtua siitä, että monikulmiot ovat liian suuria tai väärienmuotoisia käytettävän pistejoukon nopeasti muuttuvaan topologiaan nähden. Näiden ongelmien kompensoimiseksi voidaan muodostetun verkon normaalivektoreita silottaa ja verkkoa tihentää adaptiivisesti siellä, missä topografisia virheitä tai haitallisia vääristymiä harvemmalla verkkorakenteella esiintyy. Tätä kutsutaan verkon adaptiiviseksi tihentämiseksi (Adaptive Mesh Refinement). Vaihtoehtoisesti huonoja kolmioelementtejä voidaan poistaa joko lisäämällä solmupisteitä, käyttäen eri diagonaaleja tai suorittamalla pistejoukon verkotus alueellisesti uudelleen. Verkon monikulmioiden poistamiseen ja

uudelleenmuodostamiseen liittyy tosin riski, että solmupistejoukon uudelleenprosessointi muodostaa uusia huonoja monikulmioita. [43, s. 28, 32, 44.]

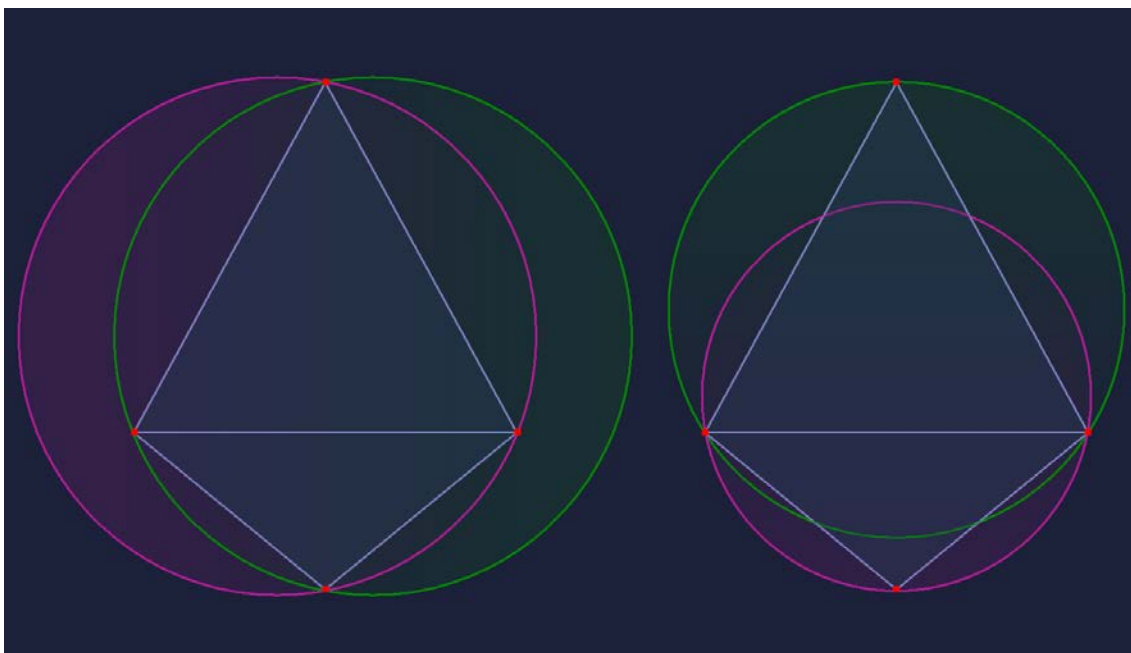


Kuva 35. Monikulmioverkon rakenne on käytettävien solmupisteiden osalta tulkinnanvarainen. (Kuva: Pekka Helenius)

5.5.8 Delaunayn kolmiointi

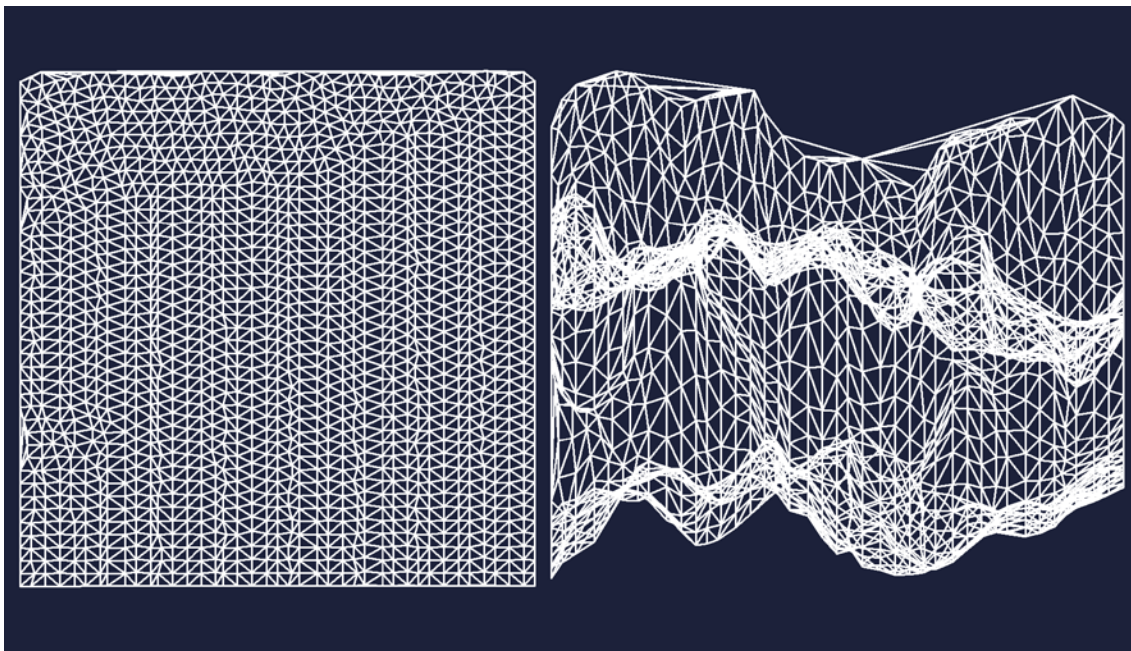
Delaunayn kolmiointi (Delaunay Triangulation) on vuonna 1934 venäläisen geometriaan erikoistuneen matemaatikko Boris Nikolaevich Delaunayn kehittämä, kaksi- ja kolmiulotteiseen avaruuteen soveltuva kappaleiden kolmiointimenetelmä [56, s. 32].

Kolmioinnissa yksittäinen monikulmio muodostetaan luomalla kaksiulotteisessa avaruudessa pienin mahdollinen ympyrä, jonka sisäpuolelle jää kolmen pisteen muodostama joukko (kuva 36). Kolmiulotteisessa avaruudessa luodaan vastaavasti pienin mahdollinen pallo, jonka sisään jää neljän pisteen muodostama joukko. Kaksiulotteisesti toteutettuna kolmioinnin perusyksikkö on kaksiulotteinen kolmio, kolmiulotteisesti toteutettuna tetraedri. [37, s. 11; 43, s. 19.] Työssä Delaunayn kolmiointimenetelmällä luodut rakenteet ovat kolmioita, jotka sovitetaan kolmiulotteiseen avaruuteen.



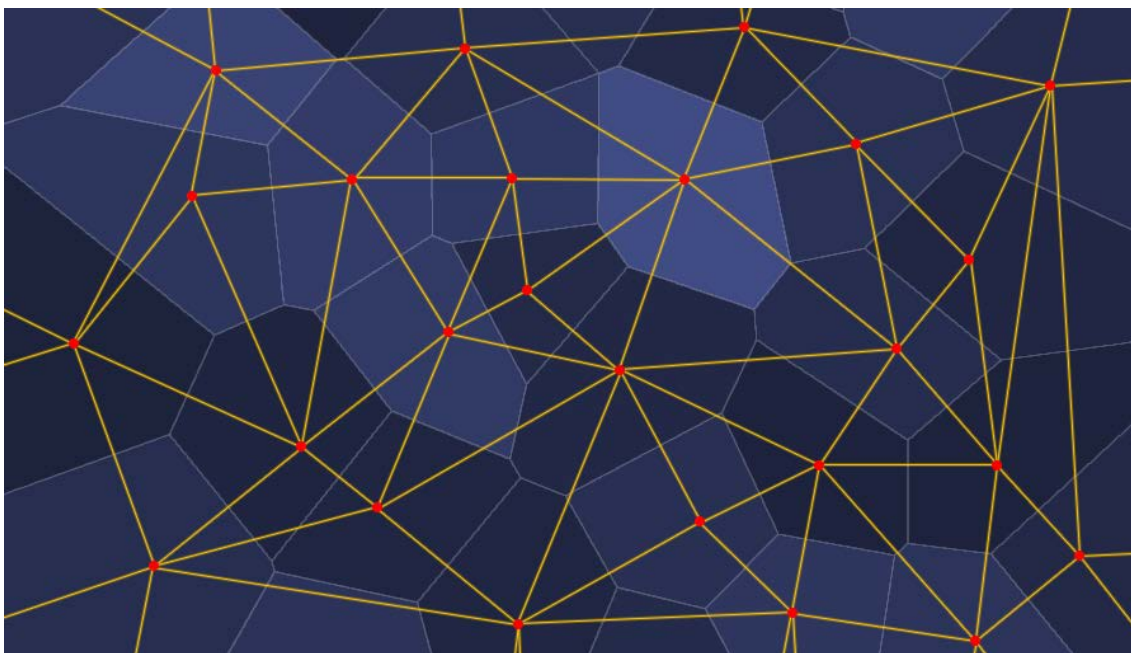
Kuva 36. Vasemmalla esitetty kolmionmuodostus ei ole Delaunayn kolmioinnin mukainen, koska ympyröiden sisään jää neljä pistettä. Sen sijaan oikealla esitetty kolmionmuodostus on Delaunayn kolmioinnin mukainen, koska ympyröiden sisään jääviä pisteitä on kolme. (Kuva: Pekka Helenius)

Delaunayn kolmiointimenetelmä pyrkii luomaan mahdollisimman tasasivuisia kolmioita käyttäen kaksiulotteista tasoa, joka voi olla XY-koordinaattiakselien tai muun määritelyn suunnan mukainen. Näin ollen kolmiointimenetelmä ei huomioi kappaleen kolmiulotteisuutta kolmioiden sivujen pituuksissa, minkä takia joidenkin tuotettujen kolmioiden sivujen pituudet voivat olla muuhun verkkoon nähden poikkeuksellisen pitkiä (kuva 37). [41, s. 59–60.]



Kuva 37. Delaunayn kolmioinnilla luodun monikulmioverkon rakenne näyttää ylhäältä kuvattuna tasaiselta, mutta kolmiulotteisessa perspektiivissä havaitaan osan kolmioista olevan muuhun verkkoon nähden keskimääräistä pidempiä. (Kuva: Pekka Helenius)

Delaunayn kolmiointi pohjautuu Voronoin kaavioon (Voronoi Diagram), joka muodostaa alueellisesti rajattuja solurakenteita epäsäännöllisesti jakautuneiden pisteiden ympärille (kuva 38). Voronoin kaavio koostuu soluista. Voronoin solu on yksittäisen pisteen ympärille rajattu suurin mahdollinen alue, jonka kaikki kohdat ovat lähempänä kyseistä pistettä kuin mitään muuta pistettä. [36, s. 150; 37, s. 8; 43, s. 18–19; 57.]



Kuva 38. Delaunayn kolmiointi perustuu Voronoin kaavioon, jonka mukaiset solurakenteet on kuvassa esitetty sinisen sävyillä. Delaunayn kolmioverkko on esitetty oranssilla, solmupisteet punaisina. (Kuva: Pekka Helenius)

5.5.9 Poissonin pinnan uudelleenmuodostus

Poissonin pinnan uudelleenmuodostusmenetelmällä (Poisson Surface Reconstruction) voidaan tuottaa kohinattomasta ja virheettömästä pisteaineistosta suljettu monikulmioverkko. Poissonin menetelmä edellyttää solmupisteiden normaalien laskemista, mihin vaikuttaa käytetyn pisteaineiston tarkkuus, yhtenäisyys ja kohinattomuus. Normaalien laskennassa tapahtuvat väärät tulkinnot ja virheet aiheuttavat vääristymiä kappaleesta tuotetun mallin rakenteeseen.

Poissonin menetelmä soveltuu suljetuille kappaleille, joista tuotettu pisteaineisto ei sisällä katvealueita. Se ei sovellu sulkemattomalle pisteaineistolle, sillä mallinnusalgoritmi pyrkii sulkemaan tällaisesta aineistosta muodostetun kappaleen, mikä aiheuttaa vääristymiä kappaleesta tuotetun mallin muotoon sulkemattomien alueiden ympäristössä. Sulkemattomia kappaleita ovat esimerkiksi maanpinnan pisteaineistot sekä katvealueita sisältävät pisteaineistot. Suljettuja kappaleita ovat esimerkiksi kaikilta pinnoiltaan tiiviisti skannatut pienesineet. [58, s. 2; 59.]

5.5.10 Manuaalinen murtoviivoitus

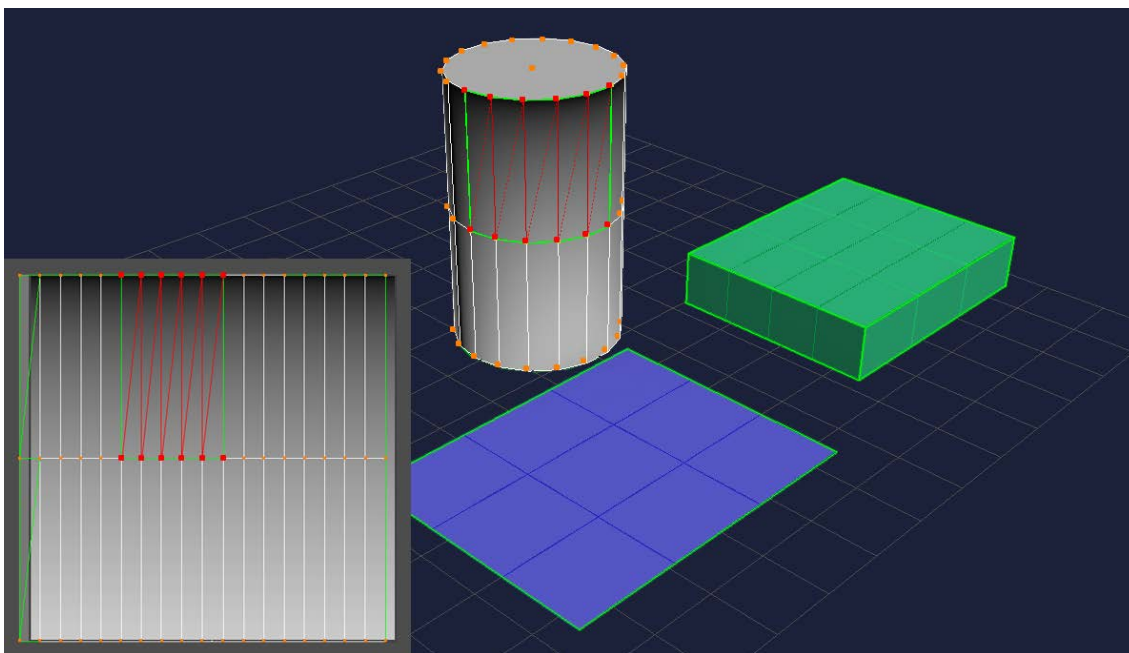
Manuaalisessa murtoviivoituksessa alkuperäisestä pisteaineistosta luodaan kappaleen ulkorakenteiden nurkkapisteitä mukaileva, yksinkertaistettu monikulmioverkko. Malli tuotetaan kappaleen nurkkien väliin muodostettavilla murtoviivoilla. Manuaalisella murtoviivoituksella ei pystytä tuottamaan niin yksityiskohtaisia malleja kuin automaattisilla mallinnusmenetelmillä, mutta yksinkertaisuutensa vuoksi se sopii keveyttä vaativiin käyttökohteisiin.

Murtoviivoituksen etu automaattisiin mallinnusmenetelmiin nähden on parempi kontrollointi verkon geometrian suhteen. Murtoviivoituksen toteuttaminen edellyttää pisteaineiston oikeaoppista visuaalista muototulkintaa mallissa käytettävien nurkkapisteiden valitsemisessa. Murtoviivoituksen luomisessa täytyy ottaa huomioon mallinnettavan kappaleen moniulotteisuus ja vaaditut tarkkuusvaatimukset, sillä moniulotteisemmat kappaleet kasvattavat mallin luomiseen käytettyä aikaa.

5.5.11 Monikulmioverkon teksturointi

Teksturoinnilla (Texture Mapping) tarkoitetaan monikulmioverkon pinnan värjäystä pikselimuotoisen bittikartan tai väriarvon mukaan. Tekstuurielementti on kaksiulotteinen, ja se sovitetaan kolmiulotteisessa avaruudessa sijaitsevan kappaleen pinnalle erillisen projektiotason avulla käärimisenpoistotekniikkaa (Unwrapping) hyödyntäen.

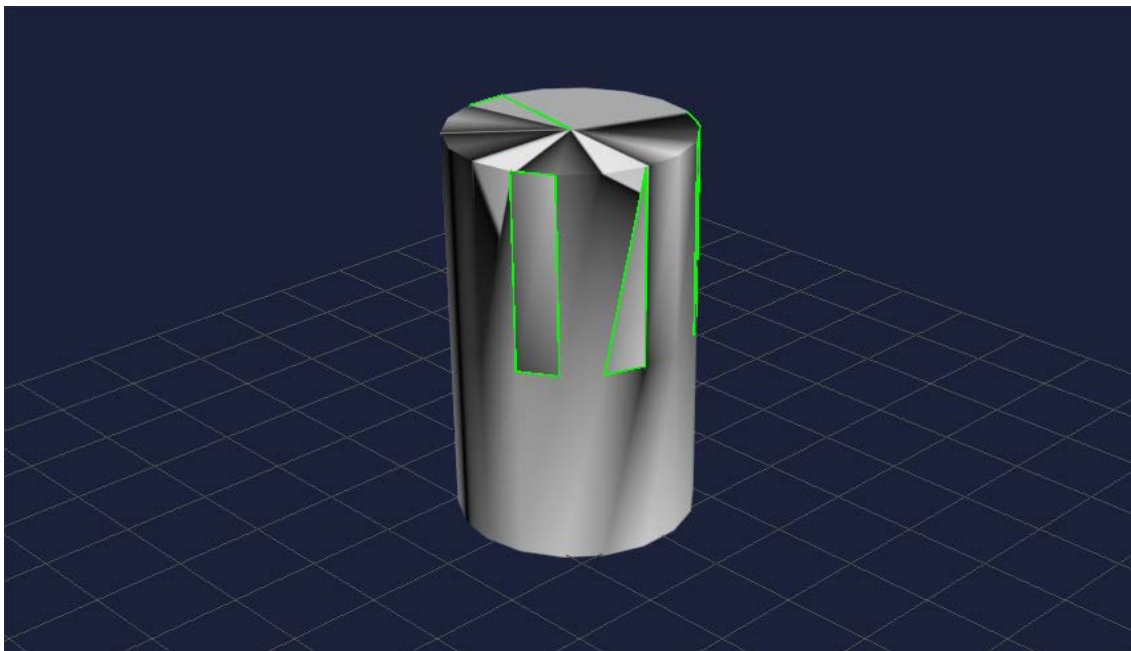
Kaksiulotteinen tekstuurikoordinaatisto tunnetaan UV-koordinaatistona. Tekstuurikoordinaatistossa määritetään kappaleen solmupisteille ja monikulmioille tekstuurikoordinaatit eli kolmiulotteinen kappale pinnoitetaan (UV Mapping) (kuva 39). [60.]



Kuva 39. UV-tekstuurikoordinaatisto sovitettuna lieriökappaleen pinnalle. Lieriöstä on valittu joukko monikulmioverkon solmupisteitä, jotka monikulmioineen on korostettu punaisella värillä. Alavasemmalla on esitetty lieriön pinnalle asetettu UV-tekstuurikoordinaatisto, jossa vastaavasti on korostettu lieriöstä valittu solmupiste- ja monikulmiojoukko. Vihreät reunaviivat osoittavat UV-tekstuurikoordinaatiston mukaista sijaintia kuvassa esitettyjen kappaleiden pinnalla. (Kuva: Pekka Helenius)

Kolmiulotteisen kappaleen projisointi kaksiulotteiseen tekstuuritasoon aiheuttaa vääristymiä projektioon sivuttain olevien monikulmioiden tekstuuripinnassa. Vääristymät näkyvät tekstuurin venymisenä niissä monikulmioissa, joihin nähden käytetty projektiopinta on epäoptimaalinen (kuva 40). Monikulmioissa esiintyvien tekstuurivääristymien vähentämiseksi kappaleen tekstuurikoordinaattien määrityksessä voidaan käyttää useampaa eri kulmista kuvattua projektiotasoa.

Useamman projektiotason käyttämisen lisäksi toisiinsa linkittyneet monikulmiot voidaan erottaa toisistaan yksittäisessä tekstuurikoordinaatistossa. Erottaminen vaikuttaa kappaleen tekstuuripinnan eheyteen ja jatkuvuuteen, mutta sillä ei ole vaikutusta kappaleen muotoon XYZ-koordinaatiston mukaisessa kolmiulotteisessa esityksessä. Erottamisesta on hyötyä tekstuurin resoluution koon optimoinnissa, koska toisistaan tekstuurin osalta poikkeavat pinnat saadaan esitettyä bittikartassa vierekkäin. Sitä käytetään esimerkiksi rakennusten eri pintojen tekstuurin sovittamisessa. Tasomaisissa monikulmioverkoissa, kuten DTM-malleissa pilkkominen voi heikentää tekstuuripinnan eheyttä ja jatkuvuutta.



Kuva 40. Lieriökappaleen pintaan asetettu epäjatkuva ja vääristynyt tekstuuripinta. (Kuva: Pekka Helenius)

Tekstuurin resoluutio tulee olla käyttötarkoituksensa mukaan valittu: Liian pieni tekstuuri pikselöityy kappaleen pinnalla, kun taas liian suurikokoinen tekstuuri on käytettävyydeltään raskas. Tekstuuriresoluution kasvattaminen ei lisää kappaleen pinnalla esitetävien yksityiskohtien määrää rajattomasti.

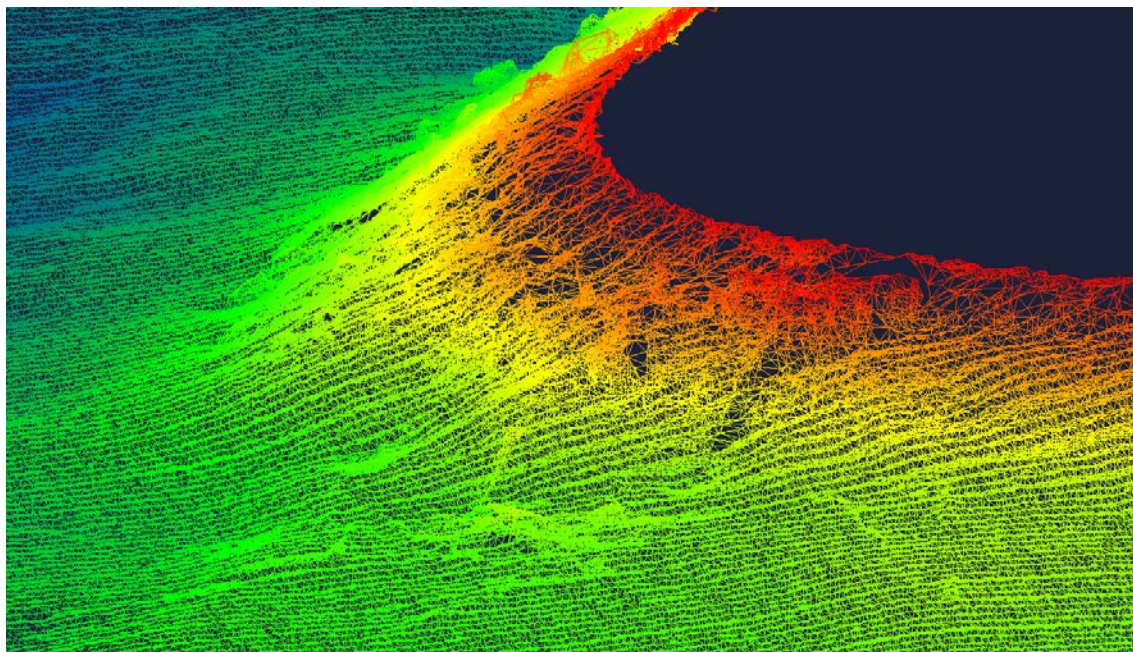
Kappaleen tekstuurin ominaisuuksia voidaan muokata varjostimilla (Shaders). Varjostimilla tekstuurin pintaan liitetään valaistusominaisuuksia kuvaavia pinnoituksia, kuten läpinäkyvyys-, heijastus-, kiilto- ja kohokuvapinnoituksia (Transparent Map, Reflection Map, Glossiness Map, Bump Map).

5.5.12 Taipaleen kanavan pohjan vektorimallinnus

Taipaleen kanavan pohja-aineistoa mallinnettiin Delaunayn kolmiointimenetelmällä ja Poissonin pinnan uudelleenmuodostusmenetelmällä. Kummatkin menetelmät edellyttivät normaalivektorien laskemista mallinnuksessa käytetyille solmupisteille.

Delaunayn kolmiointimenetelmä tuottaa tiheän monikulmioverkon, joka mukailee aineiston pintarakennetta eikä tuota esimerkiksi ylimääräisiä monikulmioita, mikäli niiden sivujen enimmäispituuksia rajoitetaan laskennallisesti ja optimoidaan aineiston tihey-

teen. Menetelmällä tuotettu monikulmioverkko on käytettävyydeltään ja tiedostokooltaan raskas, minkä vuoksi se soveltuu parhaiten video- tai kuvamuotoisiin esityksiin, jotka esirenderöidään käyttötarkoitukseen nähden sopivalla mallinnusohjelmalla (kuva 41).

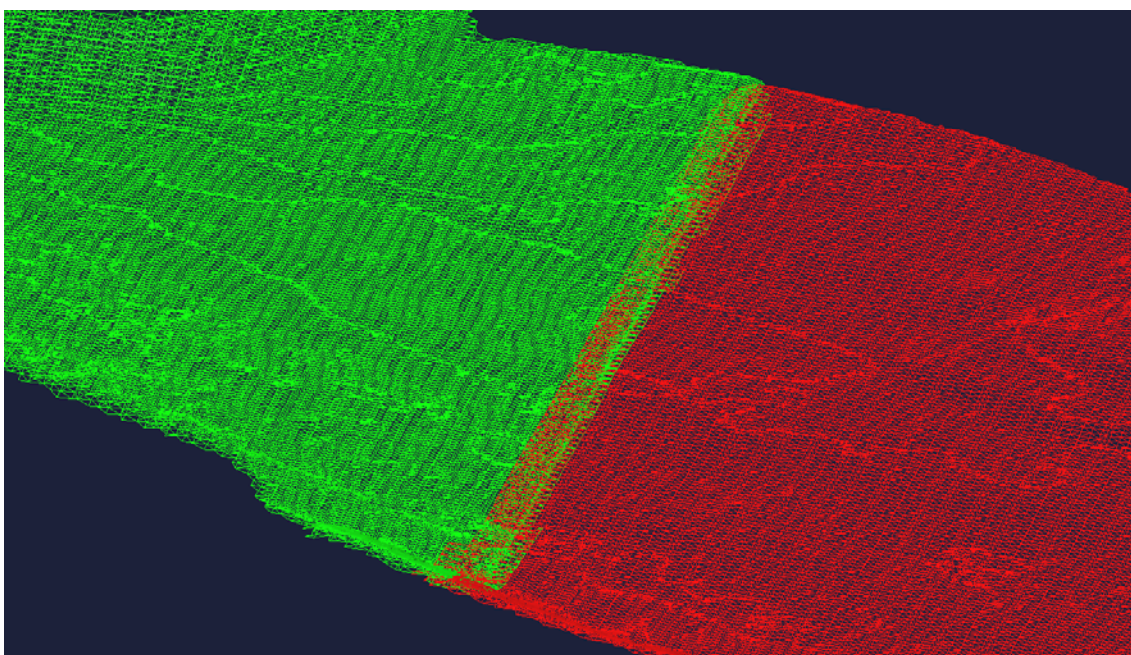


Kuva 41. Taipaleen kanavan pohjasta Delaunayn kolmiointimenetelmällä muodostetusta monikulmioverkon rautalankamalli (Wireframe Model). Monikulmioita on kuvan mallissa yli 5 miljoonaa, mikä tekee sen käsittelystä raskasta. (Kuva: Pekka Helenius)

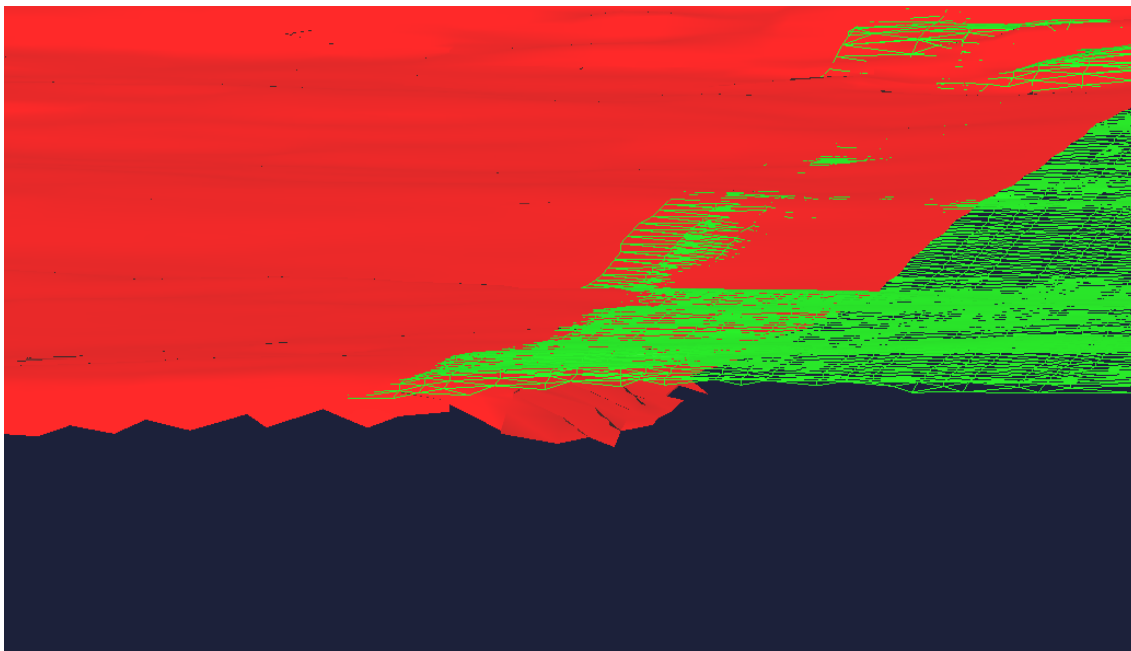
Poissonin menetelmässä pisteaineisto jouduttiin paloittelemaan neljään osaan, koska mallinnusalgorithmi ei kyennyt prosessoimaan aineistoa yhtenäisenä (kuva 42). Paloittelun seurauksena osien reuna-alueiden yhteensovitus osoittautui ongelmalliseksi, sillä Poissonin mallinnusalgorithmi pyrkii muodostamaan suljetun pinnan ja näin ollen taivutti osien reunoja alaspäin sekä muodosti reuna-alueille ylimääräisiä monikulmioita. Taivutus aiheutti reunoille vääristymiä, jotka eivät muodostaneet yksiselitteistä pintarakennetta osien välille (kuva 43). Mallin osien vääristymien vuoksi Poissonin menetelmän todettiin olevan kelvoton pohja-aineiston mallintamiseen algoritmin syöttöparametrien optimoinnista huolimatta (kuva 44).



Kuva 42. Poissonin menetelmällä Taipaleen kanavan pohja-aineisto täytyi paloittaa neljään osaan. Osien väliset epäjatkuvuuspinnat on kuvassa merkitty punaisella. (Kuva: Pekka Helenius)



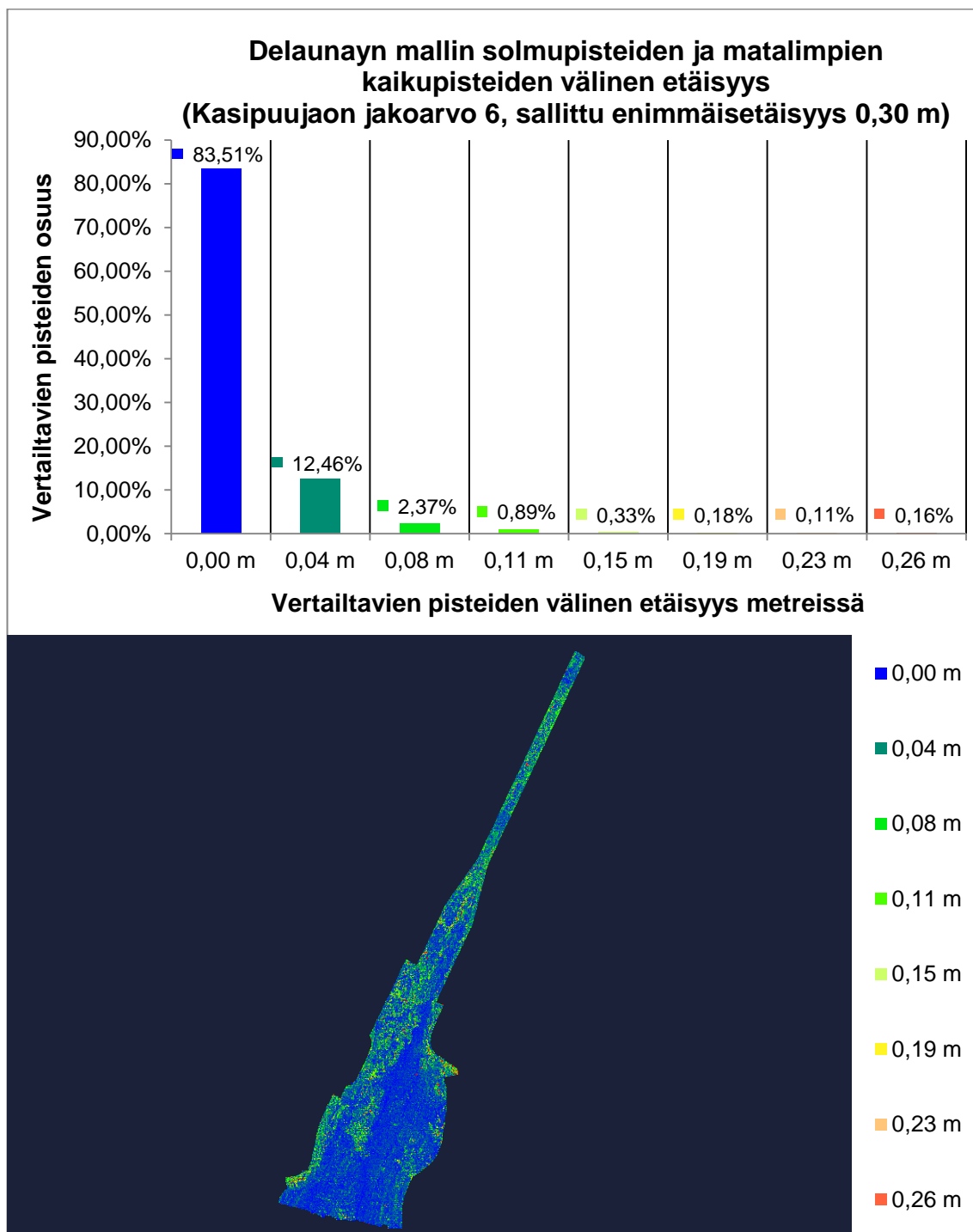
Kuva 43. Poissonin menetelmällä luodut palat limittyivät toistensa päälle kuvan osoittamalla tavalla muodostaen epäjatkuvuuspinnan. (Kuva: Pekka Helenius)



Kuva 44. Toistensa päälle limittyneet pohjan osat aiheuttivat topografisia vääristymiä, tulkinanvaraisuuksia ja epäjatkuvuuspintoja, minkä vuoksi Poissonin menetelmän ei katsottu soveltuvan pohja-aineiston mallintamiseen. (Kuva: Pekka Helenius)

Monikeilaimen tuottamat kaikupisteet sisältävät korkeuden suhteen hajontaa, jonka kontrolloiminen solmupisteotoksen valinnassa koettiin ongelmalliseksi sekä Delaunayn kolmioinnissa että Poissonin pinnan uudelleenmuodostusmenetelmässä. Jotta menetelmät soveltuisivat sellaisenaan monikeilaimella tuotetun pistepilven prosessointiin, tulisi solmupisteotoksen valintakriteerit olla paremmin kontrolloitavissa. Mikäli hajontaa ei huomioida, on riskinä, että solmupisteiksi valitaan satunnaisesti sellaisia pisteitä, jotka eivät edusta parhaita mahdollista arvioita tosiasiallisesta syvyysarvosta. Toistaiseksi hajonnan huomioiminen edellyttää aineiston esikäsittelyä, jossa ylimääräinen mallinnuksen ulkopuolelle jätettävä kaikupistemassa karsitaan pois ennen varsinaista mallintamista.

Hajonnan tutkimiseksi työssä suoritettiin vertailuanalyysi Delaunayn kolmiointimenetelmällä tuotetun mallin solmupisteiden ja matalimpien kaikupisteiden välille. Analyysissä pistepintojen väliset etäisyydet laskettiin jakamalla aineisto kasipuujaon jakoarvolla 6 sekä rajoittamalla vertailtavien pisteiden keskinäinen enimmäisetäisyys 0,30 metriin. Analyysin tuloksia on esitelty oheisessa kaaviossa 3:

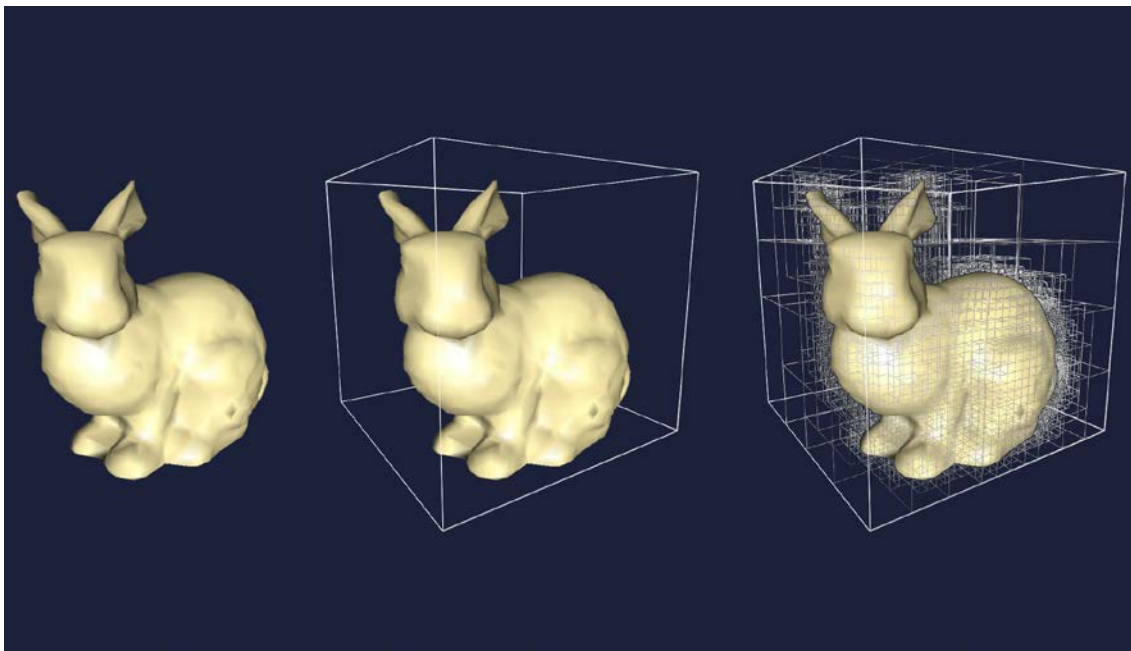


Kaavio 3. Delaunayn mallin solmupisteiden ja matalimpien kaikupisteiden keskinäiset etäisyydet ovat enimmäkseen alle 0,10 metriä. Laskenta suoritettiin myös kasvattaen vertailtavien pisteiden sallittua enimmäisetäisyyttä 0,80 metriin. Laskentojen havaittiin pieniä eroja tulosten suhteen, joskin erot eivät olleet merkittäviä.

Kasipuujaolla (Octree) kolmiulotteinen malli, rakenne, piste- tai arvojoukko jaetaan pienempiin soluihin. Nämä solut ovat rajaukseltaan säännöllisen muotoisia alueita, jotka jaetaan rekursiivisesti samanlaisiin pienempiin alasoluihin (kuva 45). Kasipuujaossa jokainen rekursiivisesti tuotettu solu sisältää kahdeksan alasolua. Kasipuujakoa hyödynnetään laajojen paikkatietoaineistojen indeksoimisessa sekä pistepilvien prosessoinnissa. Pistepilvissä kasipuujaolla voidaan parantaa aineiston pakkausta sekä optimoida ruudulla tuotettavan näkymän renderöintitehokkuutta säilyttäen samalla aineistossa esiintyviä yksityiskohtia. Renderöinnin tehostaminen toteutetaan näkymäkartion leikkausmenetelmällä (View Frustum Culling), joka mahdollistaa ruudulla näkyvän aineiston renderöinnin niin, että näkymän ulkopuolinen aineisto jätetään renderöimättä [61, s. 12; 62, s. 12].

Kaksiulotteista solujakoa kutsutaan nelipuuksi (Quadtree). Kaksiulotteisessa avaruudessa solut ovat suorakulmioita, kolmiulotteisessa avaruudessa vastaavasti suorakulmaisen muotoisia särmiöitä. Kasipuusta kehittyneempi kolmiulotteisen aineiston jakotapa on nimeltään KD-puu (K-D Tree, K-Dimensional Tree), joka laskee jokaisen tuotetun solun koon rekursiivisesti aineistoon kasipuujakoa optimaalisemmin. [41, s. 60–63; 43, s. 24–25.]

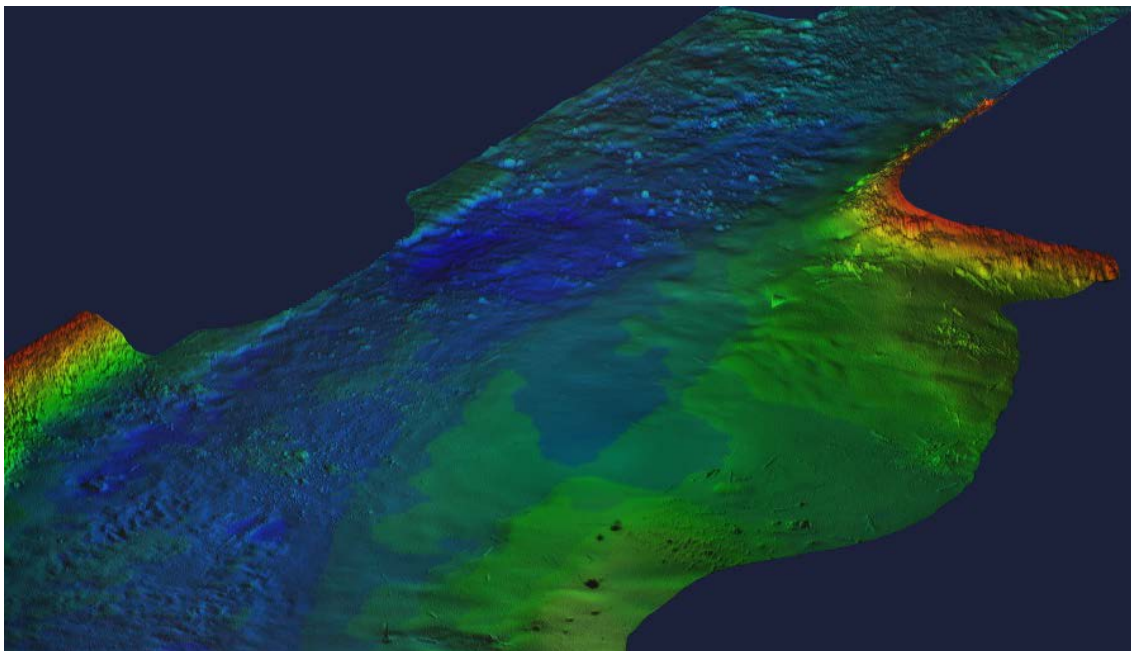
Taulukossa 4 esitetyssä vertailuanalyysissä pohjan pisteaineistoon kohdennetussa kasipuujaossa tuotetut solut jaettiin rekursiivisesti kuusi kertaa, mitä käyttäen Delaunayn solmupisteiden ja kaikupisteiden välinen etäisyysarvio suoritettiin.



Kuva 45. Kasipuujako. Vasemmalla alkuperäinen malli, keskellä malli rajattuna laatikon sisään, oikealla lopullinen, useasta alasolusta koostuva kasipuujako [63, s. 6].

Kanavan pohja-aineistosta Delaunayn kolmioinnilla tuotettu monikulmioverkko teksturoitiin. Tekstuuripintana käytettiin ruutumallimenetelmällä tuotettua esirenderöityä, pohjan muotoa mukailevaa, korkeusvärjättyä bittikarttakuvaa (kuva 46). Mallille määriteltiin UV-tekstuurikoordinaatisto, jonka mukaan kuva asemoitiin kolmiulotteisen mallin pintaan.

Teksturoidun pohjamallin havaittiin olevan käyttökelpoinen monissa eri mallinnusohjelmissa ja parantavan pohjamallin visuaalista ilmettä. Korkeusrasterin lisäksi pohjamallin tekstuuripintana voidaan käyttää myös kaikuluotainlaitteistolla tuotettua georeferoitua kuvamosaiikkia.

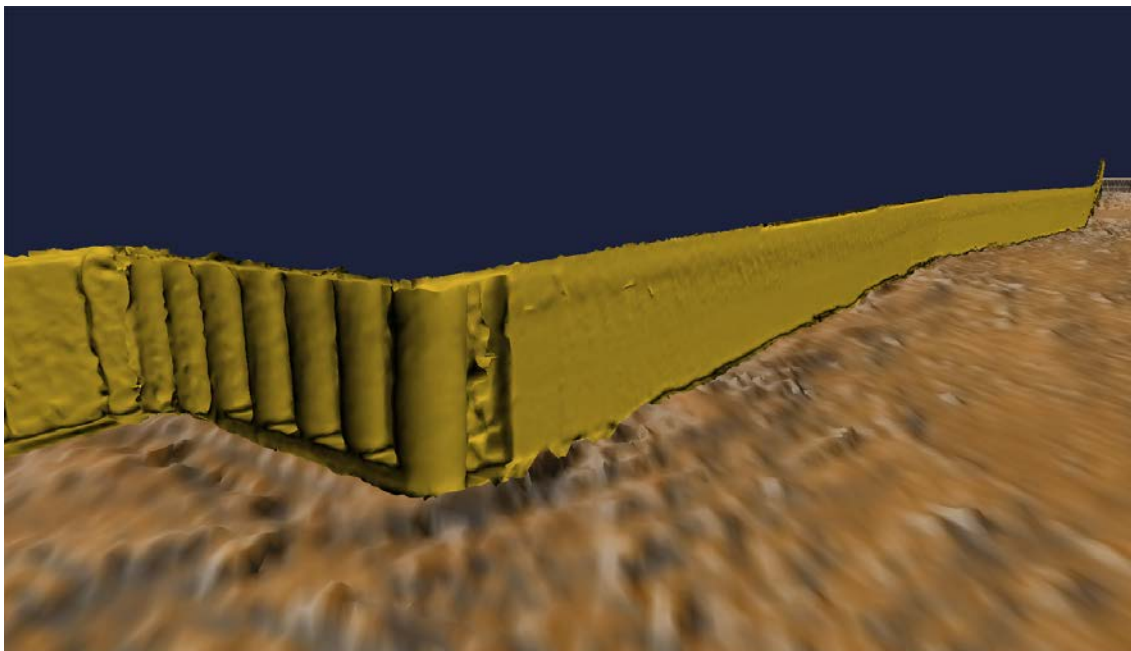


Kuva 46. Korkeuden mukaan värjätty Taivassalmen kanavan pohjan DTM-malli. Eri varjostinasetukset parantavat mallin yksityiskohtien syvyysvaikutelmaa ja tuovat esiin muun muassa pohjaan kohdistuneiden luonnollisten fluviaaliprosessien ja alustoiminnan seurauksena syntyneet pinnanmuodot. (Kuva: Pekka Helenius)

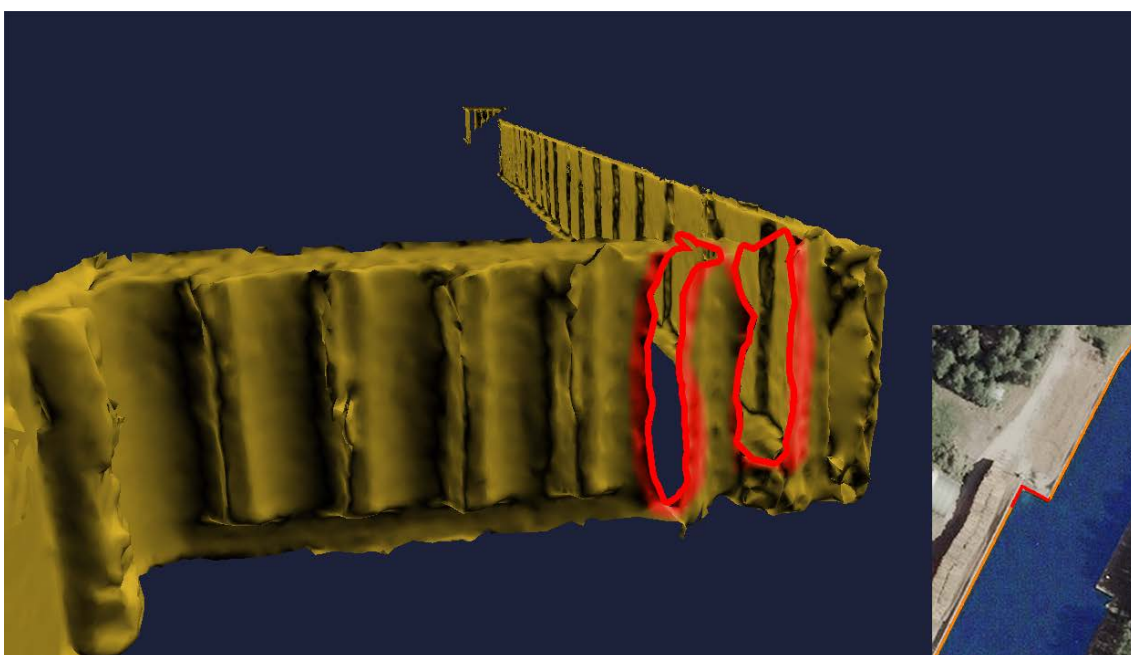
Tekstuuripinnan käyttämisessä on huomioitava käytettävän bittikarttakuvan pikseliresoluutio. UV-tekstuurikoordinaattien määrittämisessä pohjamallin monikulmioverkko tulee saada sovitettua oikeaan kohtaan tekstuuripintaan nähden. Raskaissa DTM-malleissa manuaalisesti tehtävä sovittaminen on tietokoneelle erittäin raskasta, minkä vuoksi on suositeltavaa käyttää mallin pinnalle suoraan asettuvaa tekstuuria. Suoraan oikein asettuvalla tekstuuripinnalla ei tarvitse tehdä erikseen manuaalista tekstuurikoordinaattien määrittämistä, mikä vähentää sovittamiseen käytettyä aikaa. Tekstuurimateriaalissa voidaan visuaalisen ilmeen parantamiseen käyttää eri varjostimia, kuten kohokuvapinnoitusta (Bump Map).

5.5.13 Taivassalmen kanavan vedenalaisten seinien vektorimallinnus

Seinäaineisto mallinnettiin Delaunayn kolmioinnilla sekä tuottamalla pisteaineistoa mukaileva murtoviivoitus. Delaunayn kolmiointimenetelmä edellytti normaalivektorien laskemista mallinnuksessa käytetyille solmupisteille. Delaunayn mukaisen mallin tuottamisen jälkeen monikulmioiden normaalivektoreita tasoitettiin visuaalisuuden parantamiseksi (kuva 47). Tasoittamisessa huomioitiin aineiston mittatarkkuuden säilyvyys. Menetelmällä tuotettuun malliin jäi katvealueista johtuvia reikiä (kuva 48).

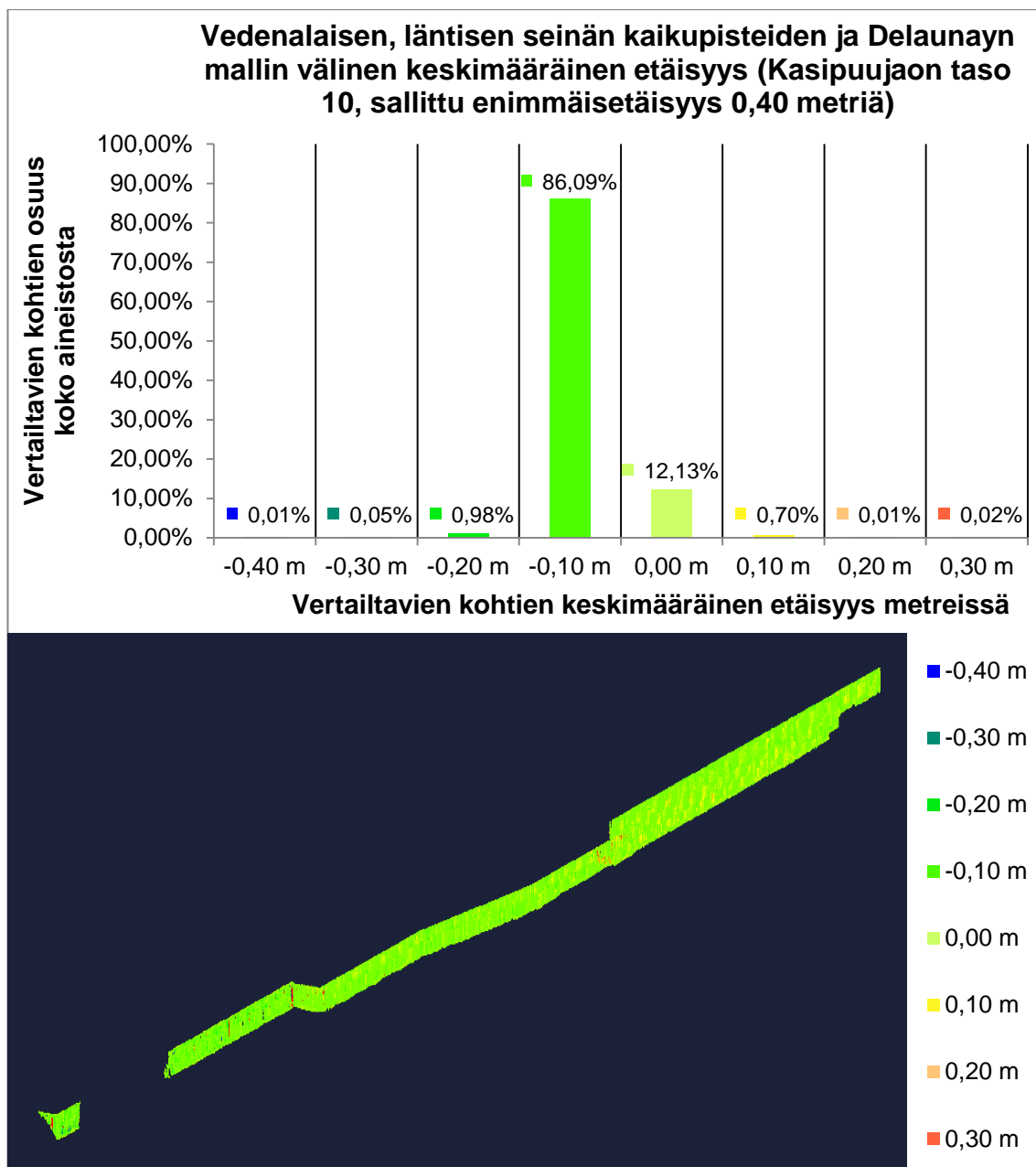


Kuva 47. Taipaleen kanavan lännenpuolen, vedenalainen seinäaineisto mallinnettuna Delaunayn kolmiointimenetelmällä, normaalivektorit tasoitettuna. (Kuva: Pekka Helenius)



Kuva 48. Delaunayn kolmioinnilla tuotettuihin seinämalleihin havaittiin jäävän katvealueista johtuvia reikiä, joiden paikkaaminen osoittautui paikoitellen haasteelliseksi. Kuvan tapauksessa mittausalus ei ole kyennyt mittaamaan Taipaleen kanavan läntisen laituriseinän nurkien katveisia takakulmia. Laituriseinä on kuvattu takapuolelta, katselusuunta etelään. (Kuva: Pekka Helenius)

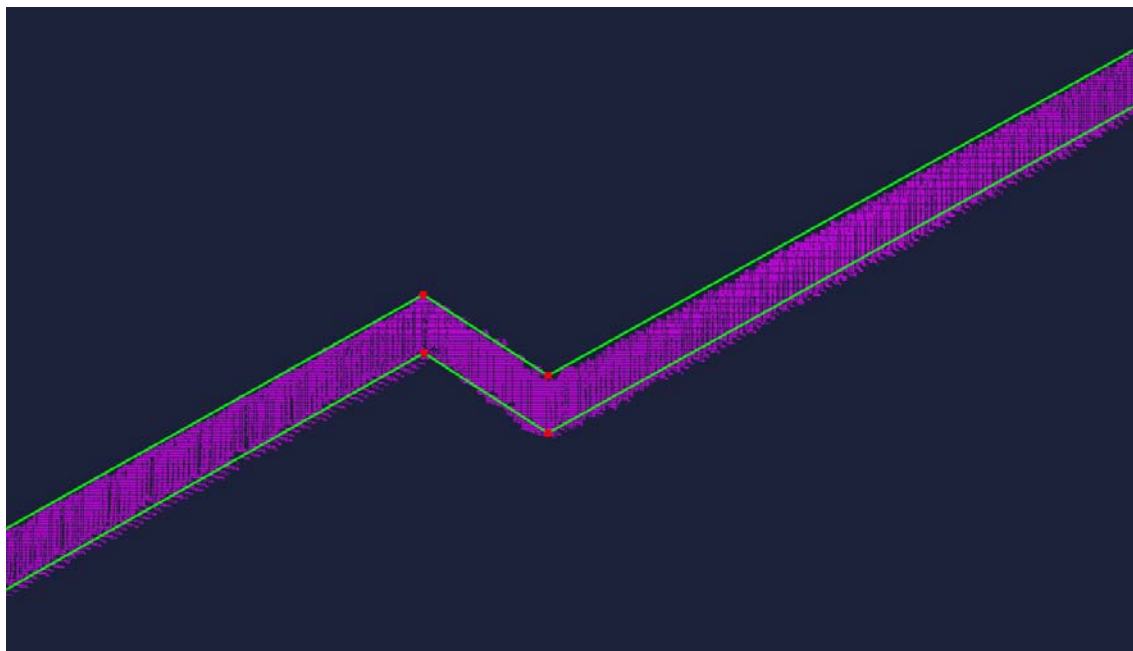
Seinärakenteista tuotettua Delaunayn mallia vertailtiin alkuperäiseen kaikupisteaineistoon oheisen kaavion 4 mukaisesti.



Kaavio 4. Vedenalaisesta, läntisestä seinästä muodostetun Delaunayn mallin mukaisen referenssipinnan ja seinän kaikupisteiden välinen keskimääräinen etäisyys toisistaan. Analyysi suoritettiin taulukossa esitettyjen laskentaparametrien lisäksi myös kasipuujaon tasolla 8 ja sallitulla enimmäisetäisyydellä 0,50 metriä. Merkittäviä laskennallisia eroja ei laskentaparametrien muutoksista huolimatta havaittu.

Seinärakenteet mallinnettiin Delaunayn kolmioinnin lisäksi myös luomalla pisteaineistoa mukaileva suljettu murtoviivaelementti, jonka janojen väliset pisteet linkitettiin toisiinsa siten, että elementti muodosti lopulta rakenteellisesti eheän monikulmioverkon (kuva 49). Murtoviivoituksella luodun yksinkertaisen mallin etuina esimerkiksi Delaunayn kolmioinnilla luotuun malliin ovat keveys ja Taipaleen länsilaiturissa kiinni ol-

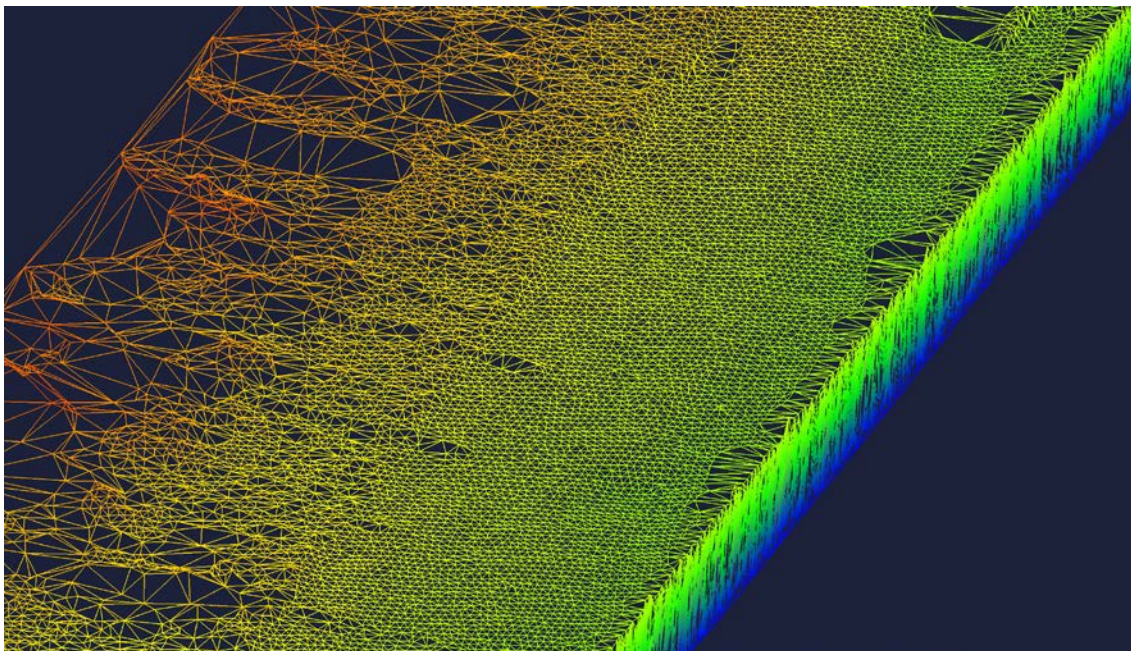
leen aluksen aiheuttama katvealueen kompensointi. Murtoviivoituksen tekeminen mahdollistaa seinän mallin muodostamisen myös katvealueiden kohdalle, mikäli mallinnuksen kannalta olennaisten nurkkapisteen koordinaatit ovat saatavilla.



Kuva 49. Murtoviivoituksella luotu yksinkertainen rautalankamalli Taipaleen kanavan lännenpuoleisesta, vedenalaisesta seinäaineistosta. Mallin murtoviiva on esitetty vihreällä viivoituksella ja viivaelementin janojen väliset pisteet punaisella. (Kuva: Pekka Helenius)

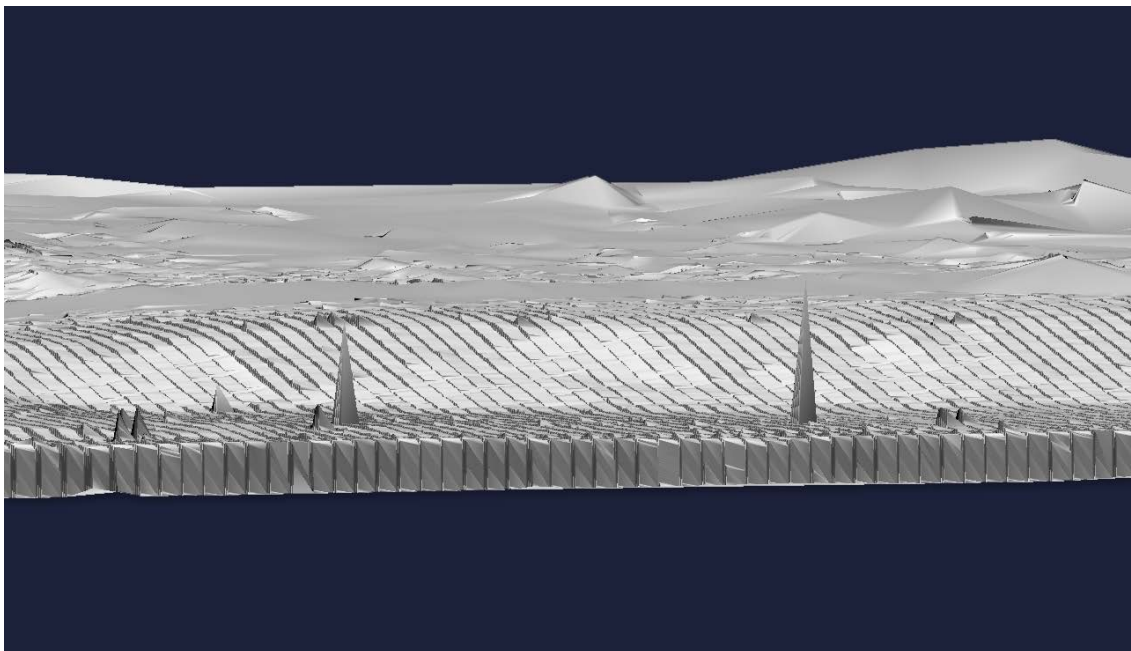
5.5.14 Taipaleen kanavan vedenpäällisten osien vektorimallinnus

Vedenpäälliset pisteet jaoteltiin mallintamisprosessissa. Maanpinnan pisteet eroteltiin muusta vedenpäällisestä pistemassasta omaksi kokonaisuudekseen, ja ne mallinnettiin Delaunayn kolmiointimenetelmällä (kuva 50).



Kuva 50. Delaunayn kolmioinnilla luotu monikulmioverkko Taipaleen kanavan länsipuoleisesta maanpinnan aineistosta. Oikealla näkyvä pystyrakenne on kanavan vedenpäällistä seinärakennetta. (Kuva: Pekka Helenius)

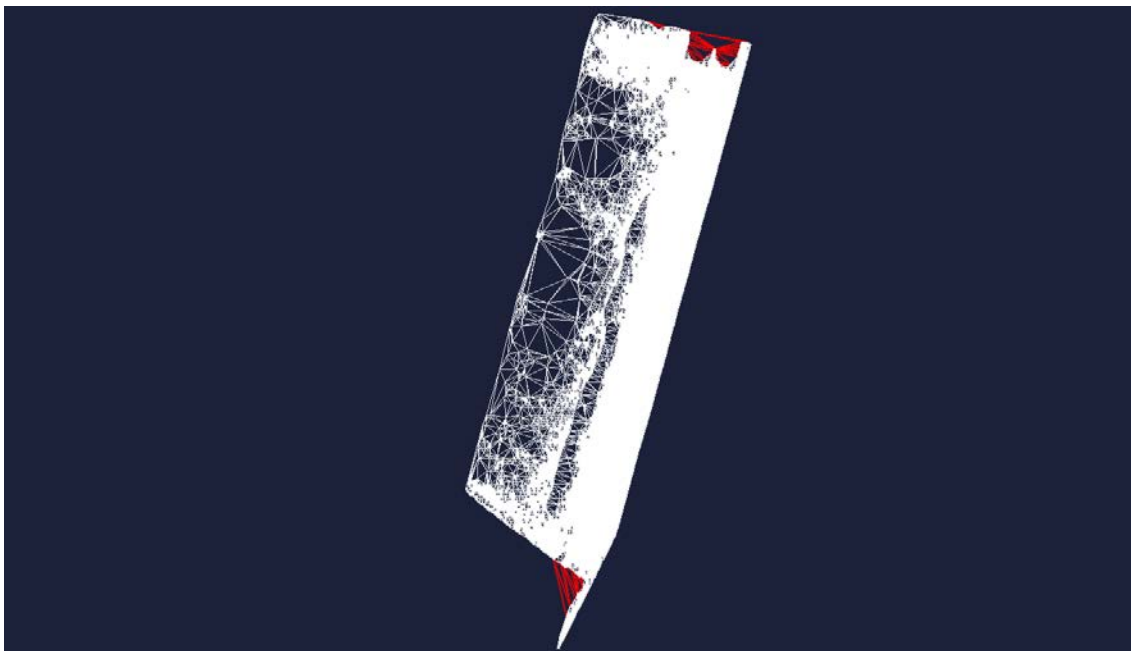
Maanpinnan pistemassasta havaittiin häiriöksi luokiteltavia pisteitä, jotka olivat jääneet manuaalisesti poistetuista valopylväiden pisteistä sekä laserkeilaimen tuottamista vähäisistä häiriöistä. Häiriöpisteet muodostavat mallinnettavaan aineistoon piikkikolmioita (kuva 51).



Kuva 51. Häiriöksi luokiteltavat pisteet aiheuttavat piikkejä kolmioitavaan aineistoon. Kuvassa muusta aineistosta merkittävästi poikkeavia häiriöpisteitä on ollut kaksi. (Kuva: Pekka Helenius)

Häiriöpisteiden erottaminen pistemassan keskeltä on haastavaa, minkä vuoksi on suositeltavaa suorittaa aineistolle joko erillinen korkeushajonta-analyysi tai tarkastella aineistoa eri kuvakulmista käsin. Piikkikolmiot voidaan havaita muusta mallista myös monikulmioverkon muodostamisen jälkeen, jolloin voidaan palata lähtötilanteeseen ja poistaa piikkejä aiheuttavat häiriöpisteet alkuperäisestä aineistosta.

Piikkikolmioiden lisäksi maanpinnan mallintamisessa tuli huomioida muodostettavien kolmioiden sivujen pituudet, koska automaattinen mallinnus tuottaa toisinaan ylimääräiseksi luokiteltavia kolmioita aiheuttaen vääriä topografisia tulkintoja malliin (kuva 52).



Kuva 52. Maanpinnan automaattiset kolmiointialgoritmit muodostavat toisinaan väärintulkintoja muodostettavien monikulmioiden suhteen. Kuvassa malliin kuulumattomat, ylimääräiset monikulmiot on korostettu punaisella värjäyksellä. Oheisessa mallissa kolmioiden sivujen pituuksien rajoittaminen on ongelmallista, koska maanpinnan verkottaminen edellyttää hajanaisen lähtöaineiston takia pitkiä kolmionsivuja. (Kuva: Pekka Helenius)

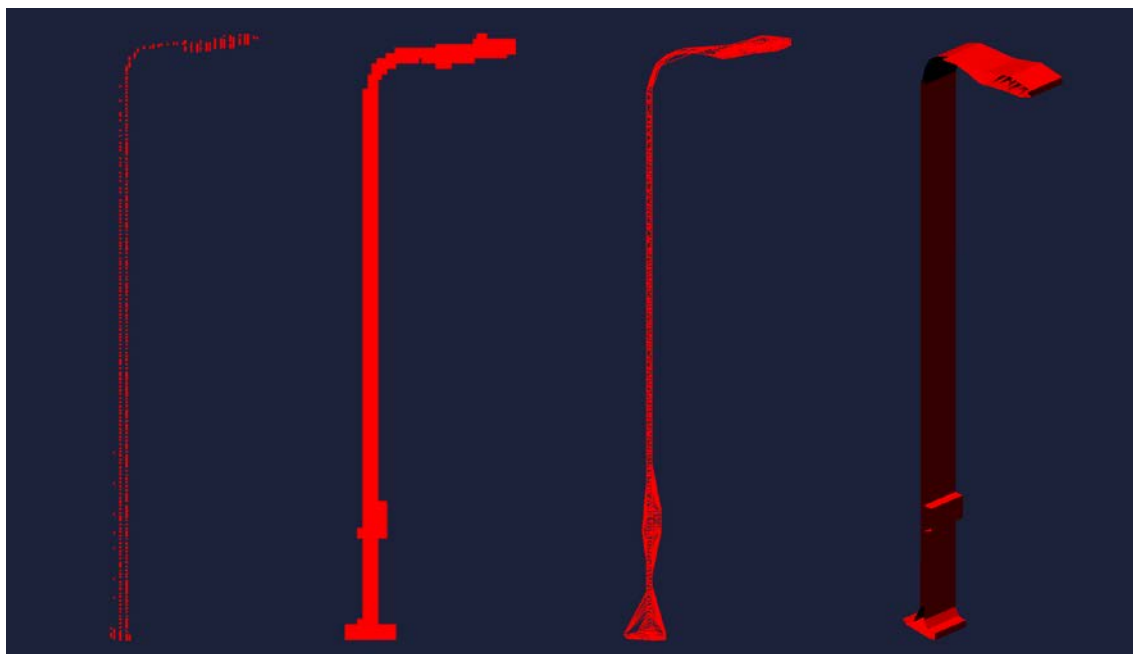
Ylimääräiset kolmiot johtuvat liian pitkien murtoviivojen muodostumisesta solmupisteiden välille. Ylimääräisten kolmioiden muodostumista on hankala välttää, mikäli lähtöaineistossa katvealueita on paljon ja alueiden välissä sijaitsevien, toisiinsa linkitettävien pisteiden etäisyydet ovat suuria. Hajanaiset, mutta oikeaoppiset pistealueet rajoittavat sitä, kuinka paljon kolmioiden sivujen pituuksia voidaan väärien kolmioiden muodostumisen ehkäisemiseksi rajoittaa. Yhtenä ratkaisuna pistemassaa voitaisiin inter- ja ekstrapoloida katveisille alueille. Tällöin kolmioiden sivujen pituudet voitaisiin pitää niin pieninä, ettei käytettävä mallinnusalgorithmi muodostaisi liian pitkiä murtoviivoja pisteiden välille. Näin ylimääräisten kolmioiden muodostumista malliin voitaisiin minimoida.

Vedenpäällisen aineiston kasvillisuutta ei sopivien mallinnusalgoritmien puutteesta johtuen mallinnettu. Mikäli kasvillisuutta haluaa visualisoida pisteaineistossa, on toistaiseksi suositeltavaa käyttää erikseen tuotettuja, monikulmioverkkomuotoisia, teksturoituja puu- ja kasvimalleja näille kohteille.

Automaattisten mallinnusalgoritmien toimivuus ja sovellettavuus ihmisen tuottamiin, mittausaluksesta MLS-mittauksella keilattujen maanpinnan kappaleiden mallintamiseen havaittiin työssä haasteelliseksi. Tällaisia kappaleita ovat kanavan varren valaisinpyl-

väät, aidat, portaat, sulkuportit ja eräät muut kanavarakenteet (kuva 53). Mallinnusalgoritmien soveltamisen hankaluuden kohteisiin nähtiin johtuvan katvealueista eli puuttuvasta pisteaineistosta sekä algoritmien kyvyttömyydestä tunnistaa yksityiskohtaisten, sulkemattomien kappaleiden muotoja oikein.

Maanpinnan kappaleiden mallinnus on suositeltavaa toteuttaa käyttäen tarkoitukseen sopivaa, pisteaineiston mallintamista tukevaa CAD-ohjelmistoa (CAD, Computer-Aided Design). Taipaleen kanavan vedenpäällisistä pienkohteista tuotettu laserkeilausaineisto soveltuu siis viiteaineistoksi CAD-mallintamiseen. CAD-mallinnus kasvattaa kuitenkin aineiston kokonaisprosessointiaikaa huomattavasti. Kohteista muodostetun valokuva-aineiston, kuten pallopanoraamojen, hyödyntäminen auttaisi CAD-menetelmällä mallinnettavien kappaleiden visuaalisessa muototulkinnassa mallintamisprosessin aikana.

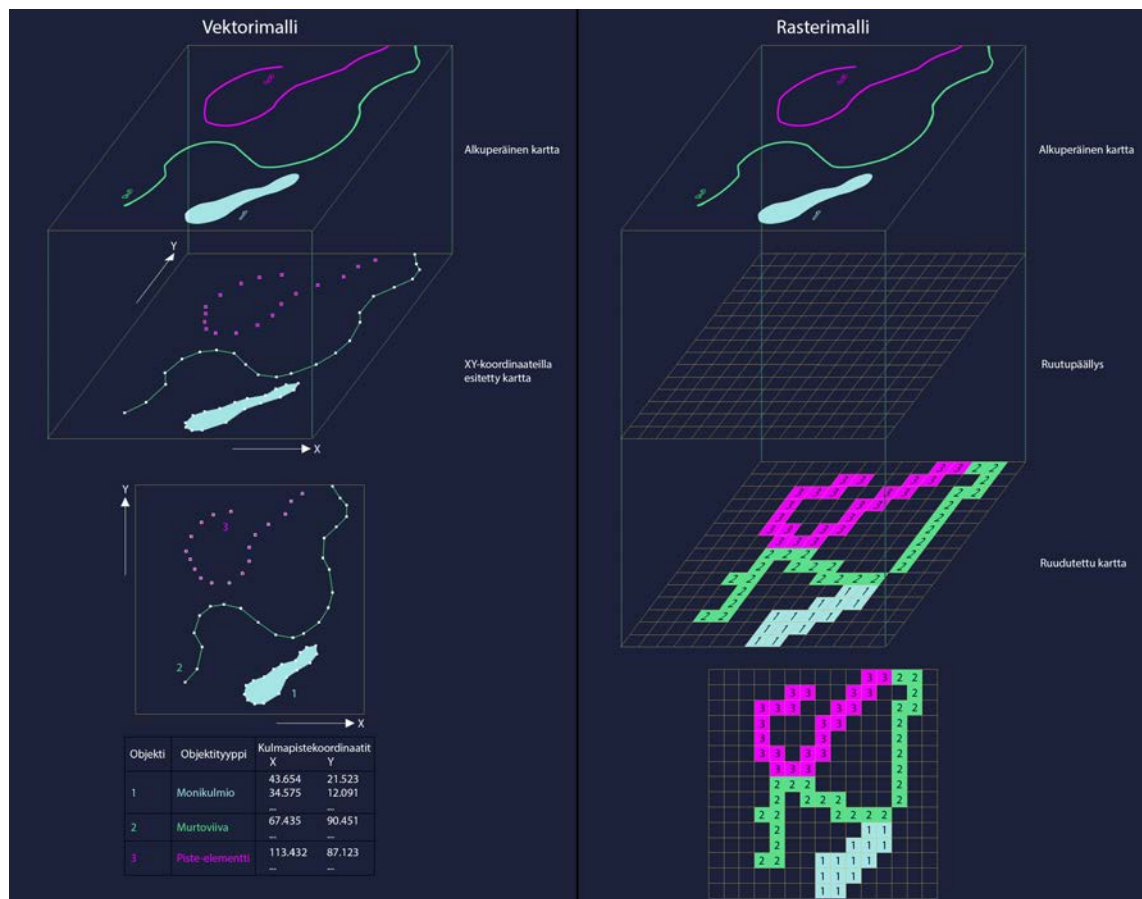


Kuva 53. Taipaleen kanavan eräästä tolpastä muodostettu kolmiulotteinen malli. Vasemmalta oikealle lueteltuna: alkuperäinen pisteaineisto, 0,7 metrin ruutukoolla tuotettu kaksiulotteinen ruutumalli, verkotettu solmupisteistö ja lopullinen kolmiulotteinen malli. (Kuva: Pekka Helenius)

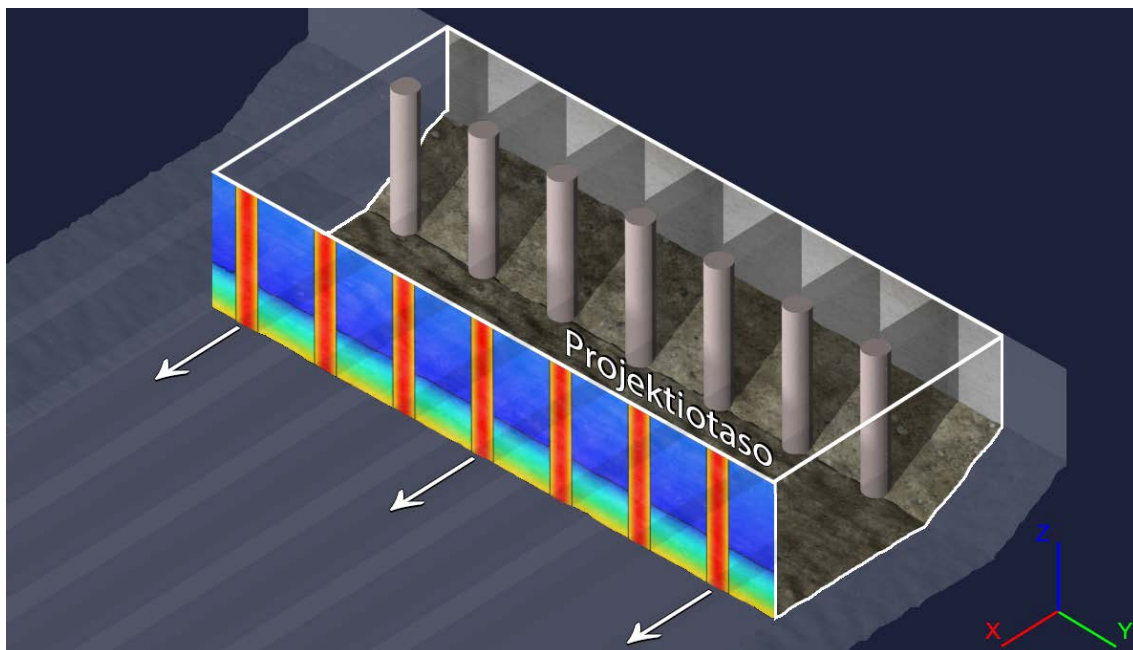
5.6 Ruutumalli

5.6.1 Rakenne

Ruutumalli on paikkatietomalli, jossa ympäristöstä kerätty digitaalinen aineisto on esitetty matriisimuotoisena, georeferoituna bittikarttakuvana. Mallin pikselit on järjestetty säännöllisiin riveihin ja sarakkeisiin, jotka muodostavat yhdessä matriisin eli ruudukon. Se poikkeaa rakenteellisesti vektorimallista (kuva 54). Ruutumallissa kohde projisoitetaan ortografiselle projektotasolle, joka on maastokohteissa usein XY-koordinaattiakselien suuntainen. Ruutumalli voidaan esittää myös XZ- ja YZ-koordinaatistoakselien tai mielivaltaisen suuntaisella tasolla riippuen projisoitavan kappaleen geometriasta ja orientaatiosta käytetyssä koordinaatistossa (kuva 55). [64.]



Kuva 54. Vektori- ja ruutumallin erot. Ruutumalli koostuu vierekkäisistä pikseleistä, ja on kooltaan vastaavaa vektorimallia suurempi. Ruutumallin suurempi koko johtuu siitä, että se on yksityiskohtien suhteen riippuvainen tallennettavien pikseleiden määrästä eikä skaalaudu vektorimallin tapaan. Vektorimalli soveltuu hyvin verkosto-analyysien tuottamiseen, kun taas rasterimalli soveltuu tiheään ja jatkuvamuotoisen tiedon esittämiseen. [36, s. 31–32.] (Kuva: Pekka Helenius)



Kuva 55. Ortografisessa projektiossa kappale kuvataan yhdensuuntaisilla säteillä kaksiulotteiselle tasolle. Kuvassa laituriseinämää on projisoitu YZ-koordinaattiakselien mukaiselle tasolle, jossa syvyysmittasuhteet on tuotu esiin korkeusvärjäyksellä. Pilareiden lieriömuotoa kyseisellä tasolla ole mahdollista esittää, vaan se edellyttäisi XY-koordinaattiakselien mukaisen tasoa, joka olisi optimaalisempi myös pohjan syvyyserojen esittämiseen. [65, s. 20.] (Kuva: Pekka Helenius)

5.6.2 Korkeusrasteri

Korkeusrasteri on ruutumalli, jossa jokainen pikseli värjätään pikselin rajaaman solun korkeus- eli Z-arvon mukaan. Värjäyksessä käytetään matemaattisesti tuotetun skalaarikentän kuvaajaa, jonka asteikko määräytyy kappaleen vähimmäis- ja enimmäiskorkeuksista. Kappaleen korkeusarvojen muutokset määrittävät siis väriarvojen jakautumisen ruutumallin pikselien välillä.

Pikseleiden korkeusarvo voidaan määrittää solun sisälle jäävien pisteiden keskiarvotetun korkeuden (Average Height), vähimmäiskorkeuden (Minimum Height) tai enimmäiskorkeuden (Maximum Height) mukaan. Skalaarikentän mukainen värjäys voidaan pisteiden korkeusarvojen lisäksi toteuttaa myös muiden koordinaatioakselien arvoilla. Vedenalaisen pohja-aineiston korkeusrasterin tuottamisessa on erityisesti huomioitava mitattujen kaukupisteiden korkeussuuntainen hajonta sekä mittalaitteistosta johtuvat puutteet ja epätasällisyydet aineistossa. [41, s. 46–47; 66, s. 36.]

5.6.3 Tiedostokoko ja resoluutio

Pikseli kuvastaa ruutumallissa yksittäistä solua. Solu rajaa maastosta määritellyn kokoisen, neliön muotoisen alueen, joka on samalla mallin ruutukoko. Ruutukoko kuvastaa yksittäisen pikselin ja sen kattaman maastoalueen koon suhdetta. Se määrittää ruutumallin resoluution.

$$\text{Ruutumallin resoluutio} = \frac{X_{px} \times Y_{px}}{R} \text{ (px)} \quad (2)$$

, jossa X_{px} on kappaleen pituus, Y_{px} on kappaleen korkeus ja R on käytettävä ruutukoko. Näiden muuttujien yksikkönä käytetään usein SI-järjestelmän metriä.

Pikseli koostuu kolmen perusvärin, eli punaisen (R, Red), vihreän (G, Green) ja sinisen (B, Blue) eri sävyjen sekoituksesta. Tällainen pikseli on siis RGB-värjätty. Yhden värin esittämiseen tarvitaan 8 bittiä eli 1 tavu. Näin ollen RGB-värjätty pikseli vie tietokoneen muistia 3 tavua. [67, s. 5–6.] Ruutumallin mukaisen bittikarttakuvan tiedostokoko kilotavuina on

$$\text{Ruutumallin koko kilotavuissa} = \frac{3 \times \frac{X_{px} \times Y_{px}}{R}}{1024} \text{ (kt)} \quad (3)$$

Malliin sidottujen attribuuttitietojen, georeferoinnin ja käytettyyn tiedostoformaattiin sidonnaisten muiden metatietojen vuoksi todellinen tiedostokoko on kuitenkin edellä kuvattua suurempi. Jokainen solu voi sisältää RGB-väriarvon lisäksi ominaisuus- eli attribuuttitietoa, kuten korkeus- tai lämpötilatietoa, mikä kasvattaa tiedostokokoa.

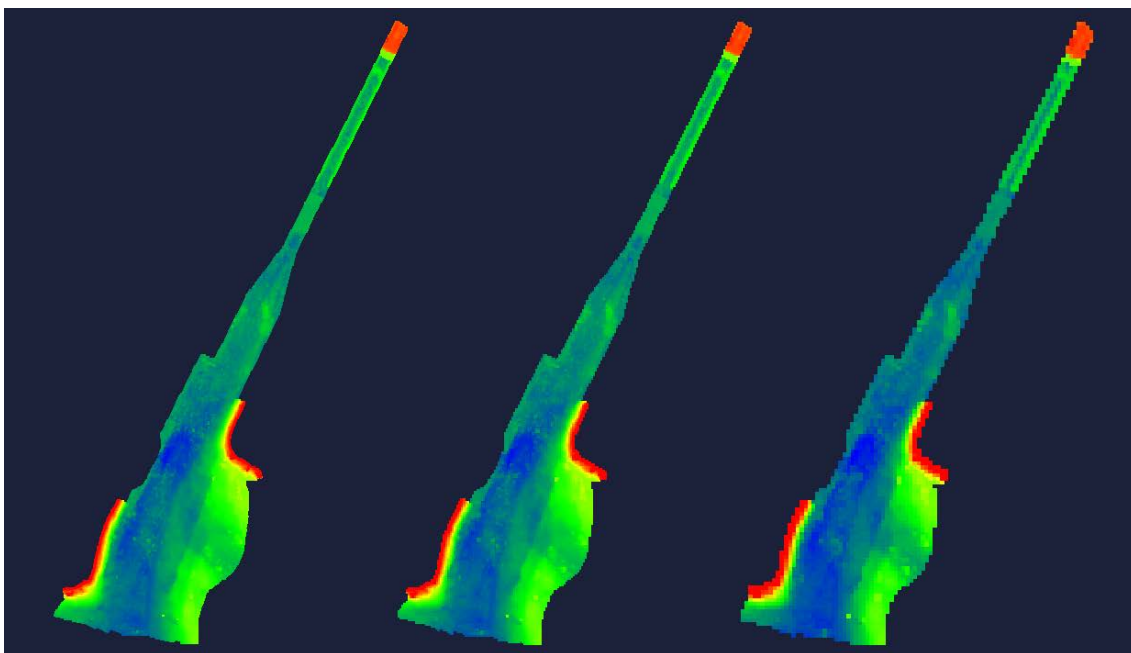
Mitä pienempää ruutukokoa käytetään, sitä suuremmaksi kasvaa mallin resoluutio ja sitä enemmän ruutumalli sisältää tietoa yksittäisestä kohteesta. Tiedon ja pikselimäärän lisääntymisen seurauksena ruutumallin tiedostokoko kasvaa, mikä asettaa rajoituksia käytettävälle ruutukoolle ja resoluutiolle. Ruutumallin tarkkuuden kannalta optimaalisin ruutukoko on sellainen, että alkuperäiseen aineistoon nähden tietohävikki on mahdollisimman pieni aineiston rakenteen säilyessä ehjänä. Ruutumallin tiedostokoko kas-

vaa ruutukoon pienentämisen eli resoluution kasvattamisen myötä, minkä vuoksi ruutukoko optimoidaan tavoiteltavan tarkkuuden ja tiedostokoon mukaan.

Ruutumallin keskelle muodostuvat reiät tarkoittavat sitä, että käytetty ruutukoko on aineiston tarkkuus huomioiden liian pieni tai aineistossa on katvealue. Yksittäisen pikselin arvo on määrittelemätön, mikäli sitä vastaavan solun sisään ei jää lainkaan pisteitä. Katvealueiden osalta alkuperäistä pisteaineistoa voidaan tietokonelaskennallisesti lisätä eli interpoloida tai ekstrapoloida, kun taas liian pienen ruutukoon käytöstä johtuva ongelma poistuu suurentamalla ruutukokoa niin, ettei aineistoon muodostu reikiä. Ruutukoon pienentäminen koko aineiston laajuudelta heikentää toisaalta resoluutiota myös tiheään ja yksityiskohtaisen pisteaineiston osalta. [36, s. 33.]

5.6.4 Taipaleen kanavan pohjan ruutumallinnus

Kanavan pohjatopografian ruutumallinnus toteutettiin muodostaen eri erotuskyvyn ruutumalleja XY-koordinaatiston mukaisille ortografisille projektioitasoille (kuva 56). Ruutukoon valintaan vaikuttivat muodostettavien mallien tarkkuudelle ja raskaudelle asetetut kriteerit. Ruutumallin luomisessa käytettiin muodostettujen ruutujen sisään jäävien pistejoukkojen ylintä korkeusarvoa, koska ensimmäisen kaikuvasteen oletetaan saapuneen lähimpänä pintaa sijaitsevan kaikupisteen kohdalta. Monikeilaimen tuottamassa pisteaineistossa on pinnan korkeuden suhteen hajontaa, joka tulee huomioida ruutumallin muodostamisen yhteydessä.



Kuva 56. Taipaleen kanavan pohjasta tuotettuja korkeusrastereita. Vasemmalta oikealle: ruutukoon $1,0 \times 1,0$ m mukainen korkeusrasteri, $2,0 \times 2,0$ m mukainen korkeusrasteri ja $4,0 \times 4,0$ m mukainen korkeusrasteri. Ruutukoon kasvaessa korkeusrasterissa on havaittavissa pikselöitymistä eli resoluution heikkenemistä, mikä vaikuttaa yksityiskohtien eroteltavuuteen. (Kuva: Pekka Helenius)

Taipaleen kanavan pohjasta toteutettiin oheisen taulukon 2 mukaiset ruutumallit:

Taulukko 2. Taipaleen kanavan pohjasta tuotettujen ruutumallien tietoja. Ruutumallien resoluutioilla ja soluihin sisällytetyllä metatiedoilla on vaikutusta tiedostokokoihin.

Ruutukoko (m)	Pikseliresoluutio (X × Y)	Tiedostokoko 1 (mt)	Tiedostokoko 2 (mt)	Tiedostokoko 3 (mt)
$0,10 \times 0,10^*$	3590×6330	1041	867	694
$0,25 \times 0,25^*$	1436×2532	167	139	111
$0,40 \times 0,40^*$	898×1583	66	55	44
$0,60 \times 0,60$	599×1055	29	25	20
$2,00 \times 2,00$	180×317	3	3	2

Tiedostokoko 1 - soluihin sisällytetty metatieto:

- Pistetiheys (solukohtainen pistemäärä)
- Solujen lasketut korkeusarvot
- RGB-väriarvo

Tiedostokoko 2 - soluihin sisällytetty metatieto:

- Solujen lasketut korkeusarvot
- RGB-väriarvo

Tiedostokoko 3 - soluihin sisällytetty metatieto:

- RGB-väriarvo

*Ruutukoko tuottaa ilman interpolointia rikkonaisen ruutumallin, koska lähtöaineiston pistetiheys on ruutukokoa väljempi.

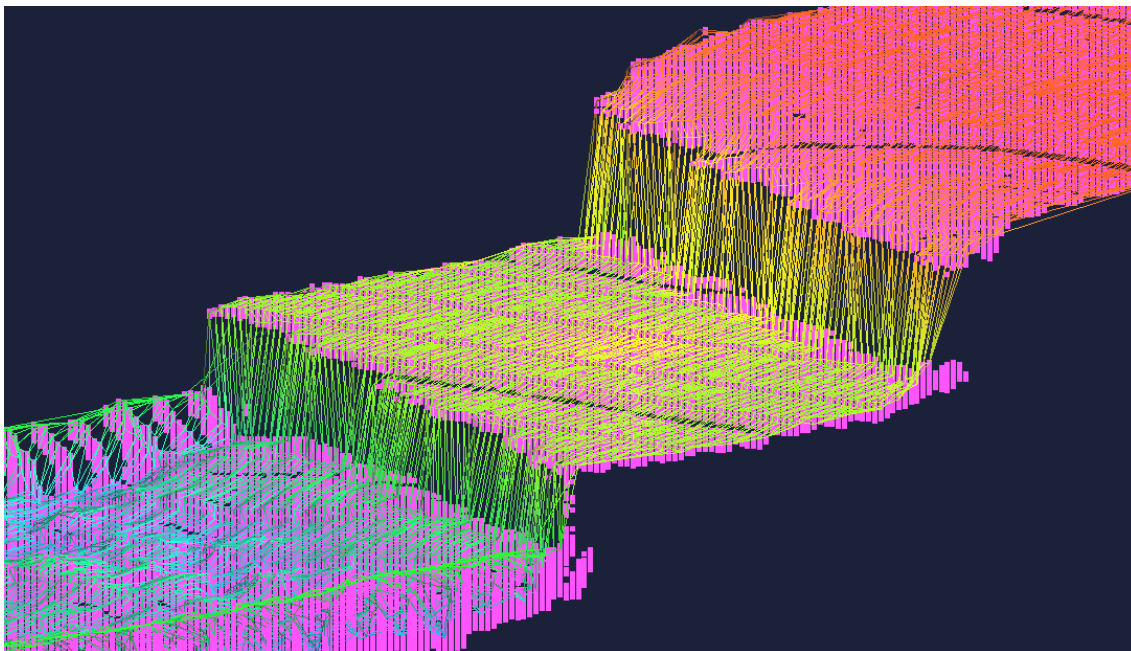
Tiedostokoot on määritelty Unix-komennolla `du --block-size=M ./*.tif`

Käytetty tiedostoformaatti on GeoTIFF (*.tif).

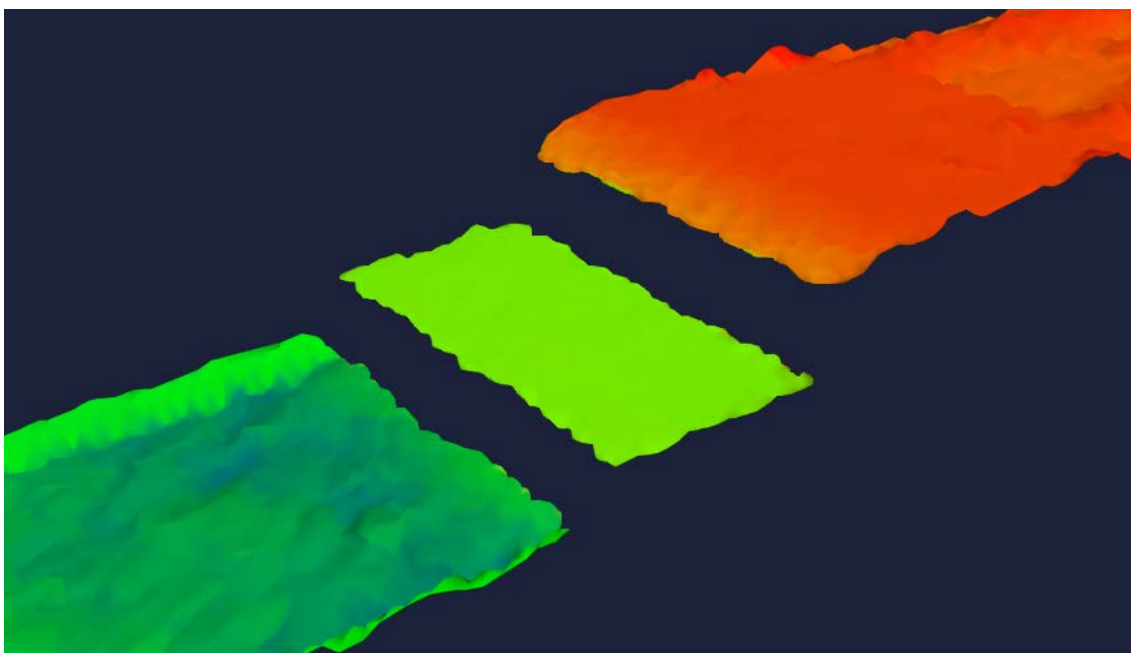
Ruutumallien pohjalta tuotettiin monikulmioverkkoja. Verkkojen osalta optimaalisimmat ruutukoot olivat $0,10 \times 0,10$ m sekä $0,25 \times 0,25$ m, joista ensimmäistä pystytään käyttämään yksityiskohtaisemmassa ja jälkimmäistä kevyemmässä mallinnuskäytössä. Näitä suurempien ruutukokojen havaittiin vaikuttavan heikentävästi tuotettujen monikulmioverkkojen tarkkuuteen, mutta merkittäviä tiedostokoon muutoksia ei monikulmioverkkoja tuotettaessa havaittu.

XY-koordinaattiakselien mukaisen ortografisen projektiotason käyttäminen ruutumallin pohjalta tuotetussa monikulmioverkossa aiheutti verkon venymää kohdissa, joissa liki samoissa XY-koordinaateissa sijaitsevien kaukupisteiden Z-koordinaattien ero oli merkittävä. Tällaisia kohtia aineistossa olivat pohjan suuret vedenalaiset kivet sekä Taipaaleen kanavan vedenalaisen, betonisen kynnysrakenteen pystyseinät. Mallinnusmenetelmä linkittää näiden alueiden solmupisteet toisiinsa, ellei muodostettavien kolmioiden sivujen enimmäispituutta rajoiteta (kuvat 57 ja 58).

Ruutumallinnus ei ortografisen projektion rajoitteiden vuoksi ota huomioon aineistossa esiintyvien kivien pohjasta irtonaisia alapintoja, mikäli ne sisältävät kaukupisteaineistoa. Mittausteknisesti katsottuna kivien alapintojen mallinnuksessa esiintyvät puutteet eivät ole kriittisiä, vaan kyse on visuaalisesta haitasta. Mittausteknisesti olennaisempaa on kivien päällisten pintojen mittatarkkuus ja oikein mallintuminen.



Kuva 57. Taipaleen kanavan betonisesta porrastasanteesta ruutumallin pohjalta luotu korkeusvärjätty monikulmioverkko. Verkonmuodostusalgoritmi on yhdistänyt toisiinsa korkeuden suhteen erillään sijaitsevat kärkipisteet betonisen kynnysrakenteen pystyseinién kohdalla, mikä aiheuttaa paikallista venymää verkon rakenteessa. Alkuperäinen hajontaa sisältävä kaukupisteaineisto on esitetty violetilla. (Kuva: Pekka Helenius)



Kuva 58. Taipaleen kanavan betonisesta porrastasanteesta Delaunayn kolmiointimenetelmällä luotu monikulmioverkko. Kolmiointinnissa on jätetty linkittämättä sellaiset solmupisteet, joiden keskinäinen etäisyys on liian suuri. (Kuva: Pekka Helenius)

5.6.5 Taipaleen kanavan vedenalaisten seinien ruutumallinnus

Vedenalaisten seinien ruutumallinnus toteutettiin muodostaen eri erotuskyvyn ruutumalleja YZ-koordinaatiston mukaiselle ortografiselle projektiotasolle (kuva 59). Ruutukoon valintaan vaikuttivat muodostettavien mallien tarkkuuteen ja raskauteen (käsittävyyteen) liittyneet kriteerit. Ruutumallin luomisessa käytettiin muodostettujen ruutujen sisään jäävien pistejoukkojen ulointa korkeusarvoa eli seinien pintojen ulommaista arvoa, koska ensimmäisen kaikuvasteen oletetaan saapuneen uloimpana sijaitsevien kaukupisteiden kohdalta häiriöttömässä aineistossa. Monikeilaimen tuottamassa pisteaineistossa on pinnan suhteen hajontaa, joka tulee huomioida ruutumallin ja sen pohjalta tuotetun monikulmioverkon muodostamisen yhteydessä.



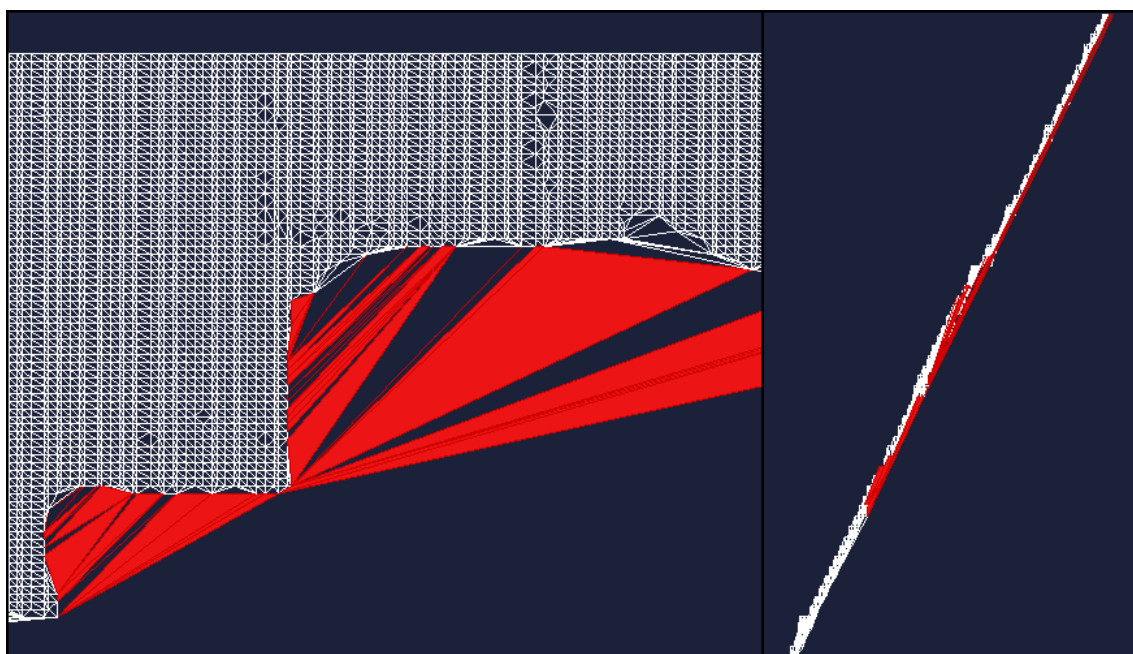
Kuva 59. Taipaleen kanavan vedenalaisesta itäpuolen seinästä YZ-koordinaatiston mukaiselle ortografiselle projektiotasolle muodostettu ruutumalli. Ruutumallissa seinärakenteiden syvyysvaikutelma ei tule ilmi, mikä aiheuttaa vääristymiä projektiotasoon nähden syvyys suunnassa sijaitseviin monikulmioverkon pintoihin. (Kuva: Pekka Helenius)

Ruutumallien pohjalta tuotettujen monikulmioverkkojen rakenteiden kannalta optimaalimmiksi ruutukoiksi tutkitun aineiston osalta havaittiin $0,10 \times 0,10$ m sekä $0,25 \times 0,25$ m ruutukoot. Verkon muodostuksessa keskeisimmiksi ongelmiksi havaittiin

- monikulmioiden venyminen niiltä osin, joissa pisteaineisto on kohdistuoraan YZ-koordinaatiston mukaista projektiotasoa kohden eli X-akselin suuntaisesti

- seinissä olevien pienien tolpparakenteiden mallinnettavuus heikkoa tai vääränlaista
- yksityiskohtien puute
- riski ylipitkien monikulmioiden muodostumiselle.

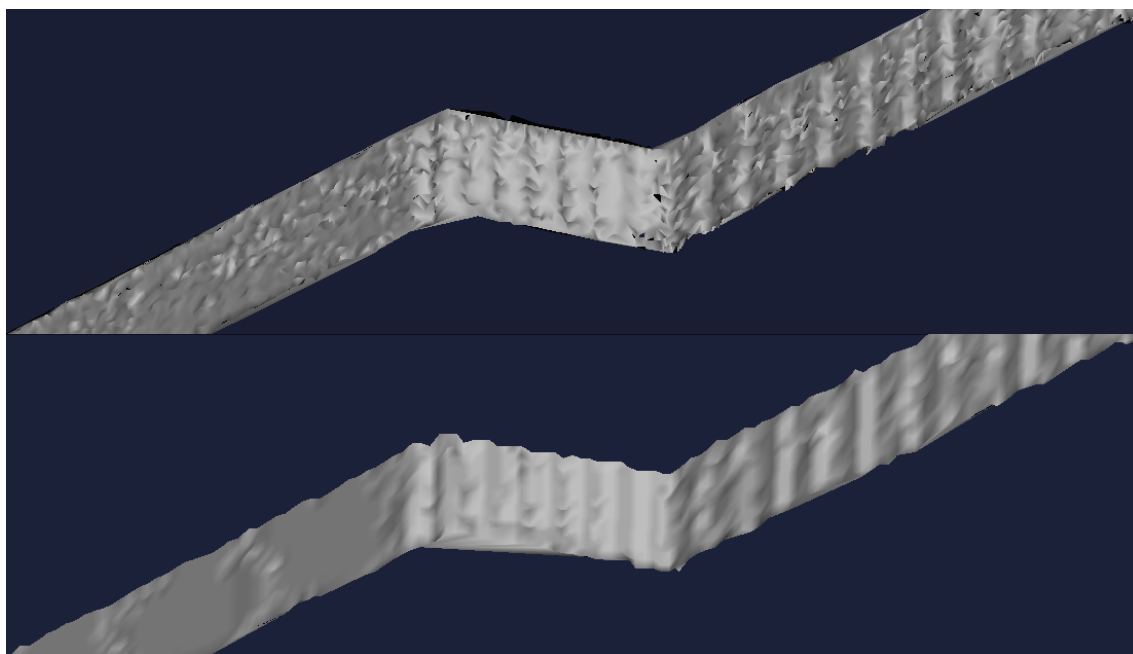
Koska nämä mallinnusongelmat vaikuttavat keskeisesti seinämallien visuaalisuuteen ja aineiston tulkintaan, todettiin potentiaalisten käyttökohteiden olevan sellaisissa käyttökohteissa, joissa voidaan käyttää karkeita ja yksinkertaistettuja malleja ja joissa mallien visuaalisuus on mittatarkkuutta tai datan tulkittavuutta tärkeämmässä roolissa. Ruutumallinnuksen pohjalta tuotettuihin monikulmioverkkoihin muodostui ylipitkiä kolmioita, joiden poistamiseen voidaan käyttää manuaalisia poistomenetelmiä tai automaattisia, kolmion sivujen pituuden mukaan kolmiorakenteita karsivia poistosuotimia (kuva 60).



Kuva 60. Taipaleen kanavan vedenalaisen, länsipuolisen seinän ruutumallista muodostettuun monikulmioverkkoon muodostui ylimääräisiä ja ylipitkiä kolmioita (punaisella), jotka poistettiin jälkikäsitelyssä. (Kuva: Pekka Helenius)

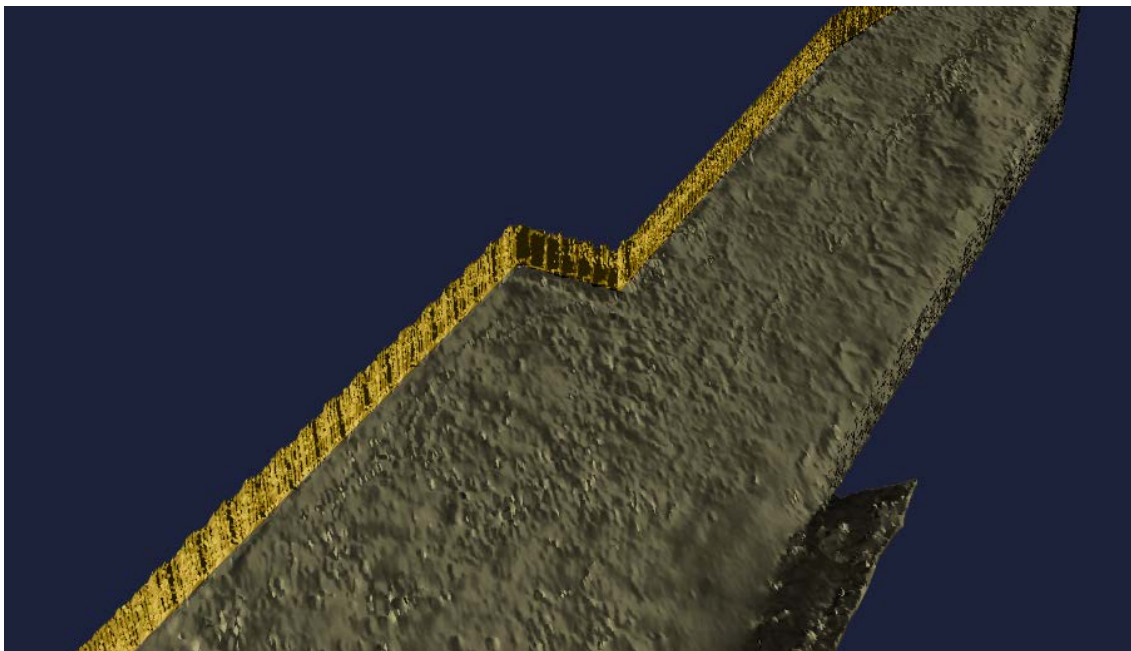
Seinien ruutumallien pohjalta luotujen monikulmioverkkojen mallinnuksessa tutkittiin ruutukoon sekä pisteaineistosta otettujen osaotosten (Subsamples) vaikutusta verkon tarkkuuteen (kuva 61). Osaotoksella tarkoitetaan pisteaineistosta valittua koko aineistoa edustavaa pistenäytejoukkoa. Osaotosmenetelmä harventaa alkuperäistä aineistoa, mikä keventää ja yksinkertaistaa monikulmioverkkomallin toteuttamista. Liiallisesti käytettynä se vaikuttaa heikentävästi tuotetun mallin rakenteeseen ja muotoon.

Pisteiden ottovälinä käytettiin lukuarvoja 0,40 m ja 0,80 m. Osaotosten käyttämisen riskinä nähtiin mahdolliset muotovirheet ennen kaikkea seinien ulkoreunojen osalta. Osaotoksia sovellettiin 0,05 × 0,05 m:n sekä 0,50 × 0,50 m:n kokoisiin ruudutettuihin aineistoihin (kuva 61). Niiden käyttämisen ei nähty olevan optimaalista seinärakenteiden mallintamisessa, koska ne huonontavat yksityiskohtien esitettävyyttä ja aiheuttavat vääristymiä seinien kulmarakenteiden mallinnuksessa.



Kuva 61. Ruutumallinnuksella luodun monikulmioverkon kärkipisteitä harvennettiin osaotoksilla. Ylhäällä Taipaleen kanavan vedenalaisen, länsipuolisen seinän malli ruutukoolla 0,05 × 0,05 m ja osaotosväliä 0,40 m. Alhaalla vastaava seinän malli ruutukoolla 0,50 × 0,50 m ja osaotosväliä 0,80 m. (Kuva: Pekka Helenius)

Ruutumallinnuksella tuotettiin lopulta malli, joka yhdistää kanavan vedenalaisen seinäosuuden ja pohjan (kuva 62). Mallissa seinät on mallinnettu ruutukoolla 0,10 × 0,10 m ja pohja ruutukoolla 0,25 × 0,25 m.

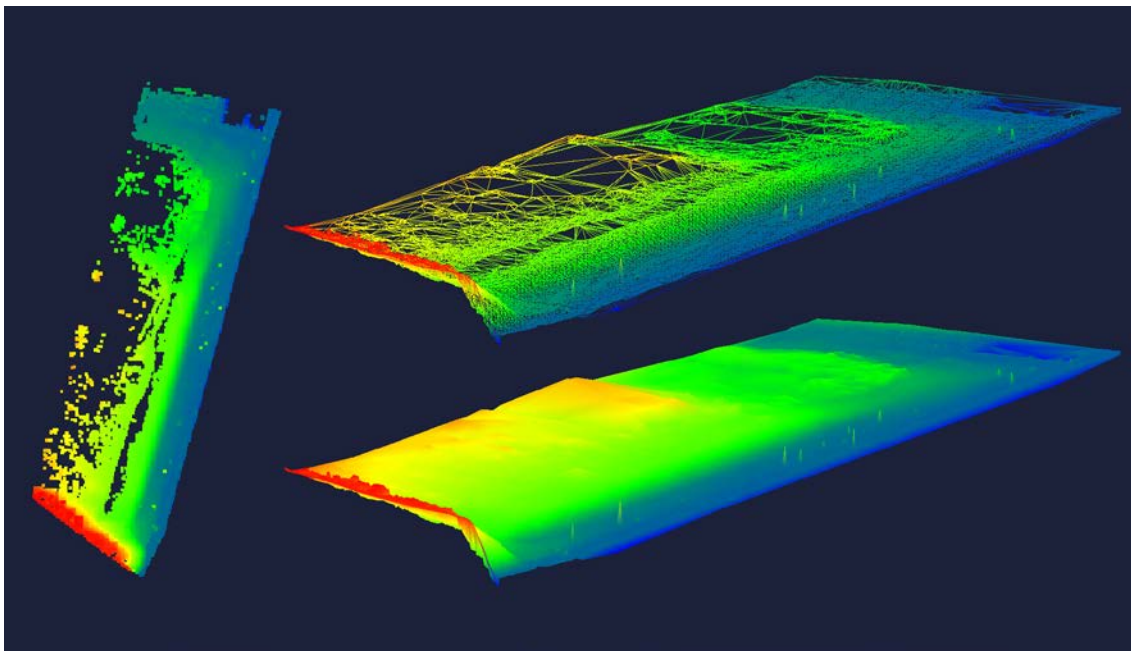


Kuva 62. Ruutumallien pohjalta tuotettu kevyt kolmiulotteinen malli Taipaleen kanavan pohja-aineistosta ja vedenalaisesta, länsipuolisesta seinästä. (Kuva: Pekka Helenius)

5.6.6 Taipaleen kanavan vedenpäällisten osien ruutumallinnus

Taipaleen kanavan vedenpäällisiä pieniä rakenteita ei mallinnettu ruutumallin pohjalta rakenteiden yksityiskohtaisuuksiin liittyvistä tarkkuusvaatimuksista ja automaattisten mallinnusmenetelmien soveltuvuusongelmista sekä aineiston katvealueista johtuen.

Taipaleen kanavan maanpinnan mallintamiseen ruutumalli ei sellaisenaan sopinut, koska se oli laadultaan riittämätön jyrkkien kulmarakenteiden, kuten laituriseinämien, mallintamiseen. Maanpinnan pisteaineiston katveisista ja hajanaisista kohdista tuotettuihin monikulmioverkon osiin muodostui pitkiä kolmioita, tai vaihtoehtoisesti vailla kolmiointitietoa olevia alueita (kuva 63). Ruutumallinnus olisi sopinut maanpinnan mallinnukseen vastaavalla tavalla kuin kanavan pohjatopografian mallintamiseen, mikäli edellä mainittuja rajoitteita ei olisi ollut.



Kuva 63. Maanpinnan ruutumallin (vasemmalla) ja mallista luodun monikulmioverkon (oikealla) pohjalta on mahdollista havaita aineiston topografiasta poikkeavat häiriöpisteet (piikkikolmiot). Vähän pisteitä sisältäville alueille on muodostunut pidempiä kolmionsivuja kuin tiiviille pistealueille. Etualalla sijaitseva laituriseinä on mallintunut huonosti. Kuvassa otos Taipaleen kanavan länsipuolen maanpinnan aineistosta. (Kuva: Pekka Helenius)

6 Mallinnusmenetelmien arviointi

6.1 Mallinnusten reunaehdot

Insinööriyössä luoduille kolmiulotteisille malleille asetettuja yhteisiä reunaehtoja olivat mallien orientoituminen alkuperäisen pisteaineiston päälle käytetyssä koordinaatistossa ja toistensa suhteen mittatarkasti, mallien oikeamuotoisuus alkuperäisen pisteaineiston suhteen sekä mallien siirrettävyys eri mallinnusohjelmien välillä. Työssä on huomioitu ja selostettu mittaustekniikoiden vaikutus tuotettujen mallien tarkkuuteen, joskin niiden käytännön arviointi osoittautui yrityksen luovuttaman aineiston perusteella sellaisenaan hankalaksi. Tarkempi arviointi olisi edellyttänyt tarkempaa kanavan mittausta koskevaa lisätietoa esimerkiksi sääolosuhteista tai mittausaluksen epäsäännöllisistä liikkeistä vedessä Taipaleen kanavassa. Tätä lisätietoa ei kuitenkaan luovutettu insinööriyöhön eikä sitä nähty merkittäväksi työlle asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi tai tutkimismenetelmien kannalta.

Työssä tutkittujen mallinnusalgoritmien soveltuvuus riippuu mallinnettavasta rakenteesta, lähtöaineiston eheydestä sekä lopputulokselle asetetuista vaatimuksista. Taipaleen kanavan aineiston orientoituminen pisteaineistoon ja toistensa suhteen onnistui vaatimusten mukaisesti, ja mallien muodoille asetetut kriteerit täyttyivät. Mallien siirrettävyys eri mallinnusohjelmien välillä huomioitiin työssä esitettyjen mallinnusmenetelmien soveltuvuutta arvioidessa. Siirrettävyyteen liittyvät haasteet liittyvät enimmäkseen tuotettujen mallien tiedostokokoihin sekä ohjelmistojen eroavaisuuksiin saman aineiston renderöintitavoissa.

6.2 Käytetyt menetelmät

Insinööriyössä pisteaineiston mallinnus toteutettiin automaattisilla ja manuaalisilla mallinnusmenetelmillä. Automaattiset mallinnusmenetelmät soveltuvat parhaiten moniulotteisten ja yksityiskohtaisuutta sisältävien mallien tuottamiseen. Yksinkertaisissa ja yksiselitteisissä rakenteissa automaattisten mallinnusmenetelmien keskeinen ongelma on niiden tuottamien monikulmioiden ja kärkipisteiden liian suuri määrä rakenteiden tosi-asiallisiin muotoihin suhteutettuna. Monikulmioiden ja kärkipisteiden määrää voi rajata, mutta se aiheuttaa usein vääristymiä rakenteellisesti yksinkertaisen kappaleen muotojen tulkinnassa. Tämän vuoksi yksinkertaisten kappaleiden manuaalinen mallinnus keveyttä korostavissa käyttökohteissa osalta on suotavaa.

Käytetyistä menetelmistä riippumatta on huomioitava, että mikään mallinnusmenetelmä ei kuvaa mitattua kappaletta täydellisen tarkasti, koska menetelmillä tuotetut mallit ovat binäärimuotoisia symbolimalleja. Kappaleen mallinnusprosessi onkin kompromissi, johon päädytään mallintamiselle asetettujen laatu- ja kokokriteereiden perusteella. Verkkojen muodostamisessa suurimpia haasteita ovat pinnan topologian säilyvyyden takaaminen eri mallinnusalgoritmeilla sekä verkkorakenteen koon optimointi. Algoritmit voivat tulkita aineistoa niin, että kolmiorakenne muodostuu topologiaaltaan vääränlaiseksi tai rikkonaiseksi. Algoritmien toimintaan liittyviä numeerisia muuttujia pystytään optimoimaan, mikä voi auttaa kolmiorakenteen muodostumiseen liittyvissä ongelmissa.

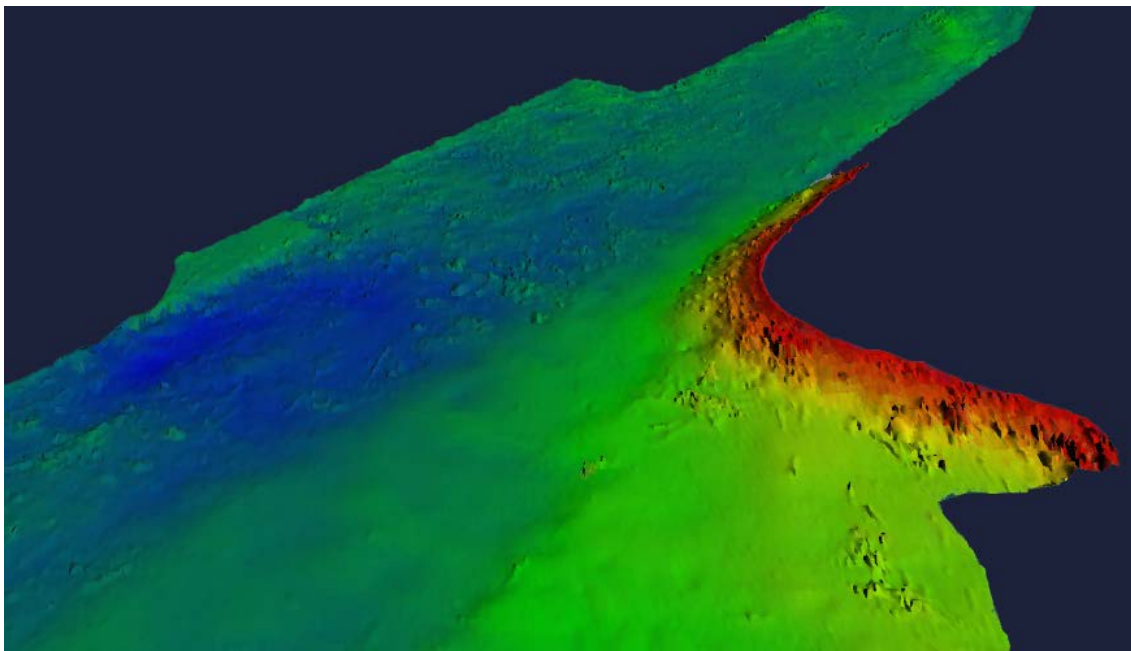
Kohteesta tuotetun, rakenteisiin nähden liian monimutkaisen tai vääränlaisen monikulmioverkon muodostuminen johtuu osittain mittauslaitteiden tuottamasta erittäin tiheästä pisteaineistosta, jonka perusteella hahmotetut kappaleet voivat olla geometriatulkinnaltaan liian monimutkaisia automaattisille mallinnusalgoritmeille. Algoritmien optimointi ja

mallinnusmenetelmien jatkokehittäminen voisivat ratkaista osan nykyisistä automaattiseen pisteaineiston mallintamiseen liittyvistä keskeisistä ongelmista. Niiden tulisi muodostaa optimoitu verkko, joka olisi mahdollisimman yksinkertainen, mutta kuvaisi pinnan topologiaa mahdollisimman hyvin.

Yksityiskohtien korostaminen monikulmioita ja kärkipisteitä lisäämällä ei ole aina optimaalista mallien rakenteisiin nähden. Mallien pinnanmuotoja voidaan korostaa käyttämällä esimerkiksi tekstuuripintaa, johon on sisällytetty yksityiskohtia korostava kohokuvapinnoitus. Kohokuvapinnoituksen tuottaminen ja soveltaminen mallinnetuille kappaleille lukeutuu työprosessiksi, jonka hyödyntämistä ei tässä työssä merkittävästi tutkittu.

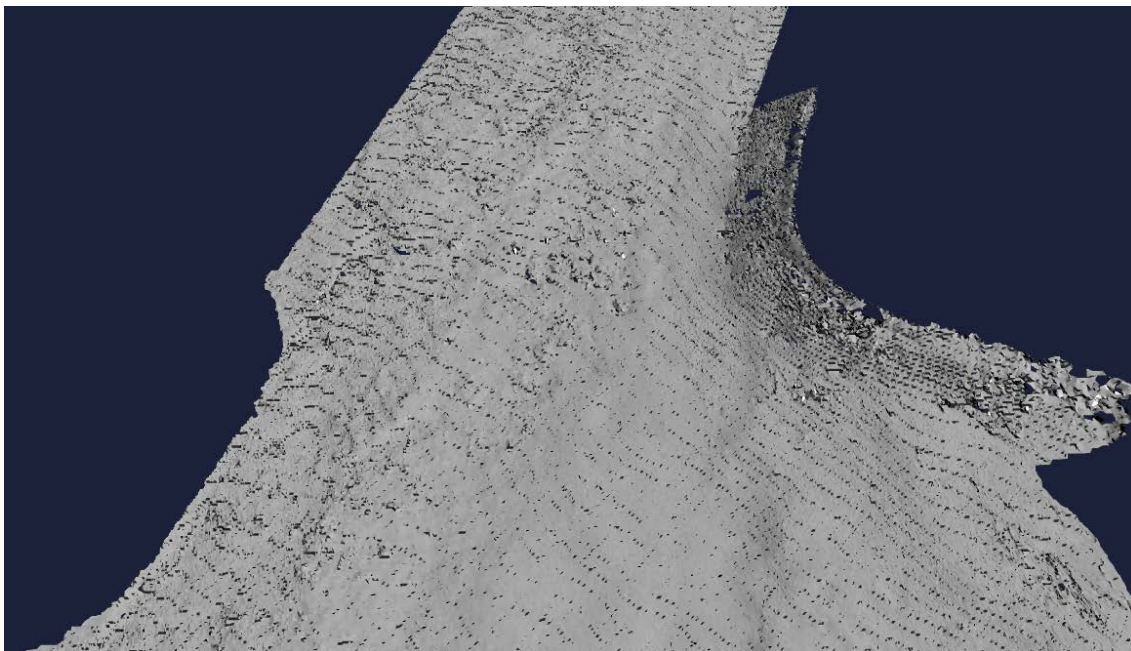
6.2.1 Taipaleen kanavan pohja

Kanavan pohja mallinnettiin ruutu- ja vektorimallinnusmenetelmillä. Pohjasta luotiin kaksi erilaatua versiota, joiden tarkkuuteen ja keveyteen liittyneet kriteerit olivat toisistaan poikkeavia erilaisista käyttötarkoituksista johtuen. Kevyempi malli tuotettiin ruutumallin pohjalta (kuva 64), kun taas raskaampi ja yksityiskohtaisempi malli tuotettiin vektorimallinnuksella. Ruutumallinnuksessa pohjasta luotiin korkeusrasteriin perustuva monikulmioverkko. Vektorimallinnuksessa monikulmioverkko toteutettiin Delaunayn mallinnusmenetelmällä.



Kuva 64. Taipaleen kanavan pohjatopografiasta tuotettiin ruutumallin pohjalta korkeusrasterikuvalla teksturoitu DTM-malli. (Kuva: Pekka Helenius)

Ruutumallinnuksella tuotettu kevyt malli soveltuu kevyempiin käyttökohteisiin, kun taas Delaunayn menetelmällä tuotettua raskasta mallia voidaan käyttää yksityiskohtaisuutta vaativissa raskaammissa käyttökohteissa. Raskasta mallia sovitettiin kevyempiin käyttökohteisiin monikulmioverkon kolmioiden määrää optimoimalla, mutta prosessoinnin havaittiin aiheuttavan artefakteja kevennetyn monikulmioverkon rakenteeseen (kuva 65).



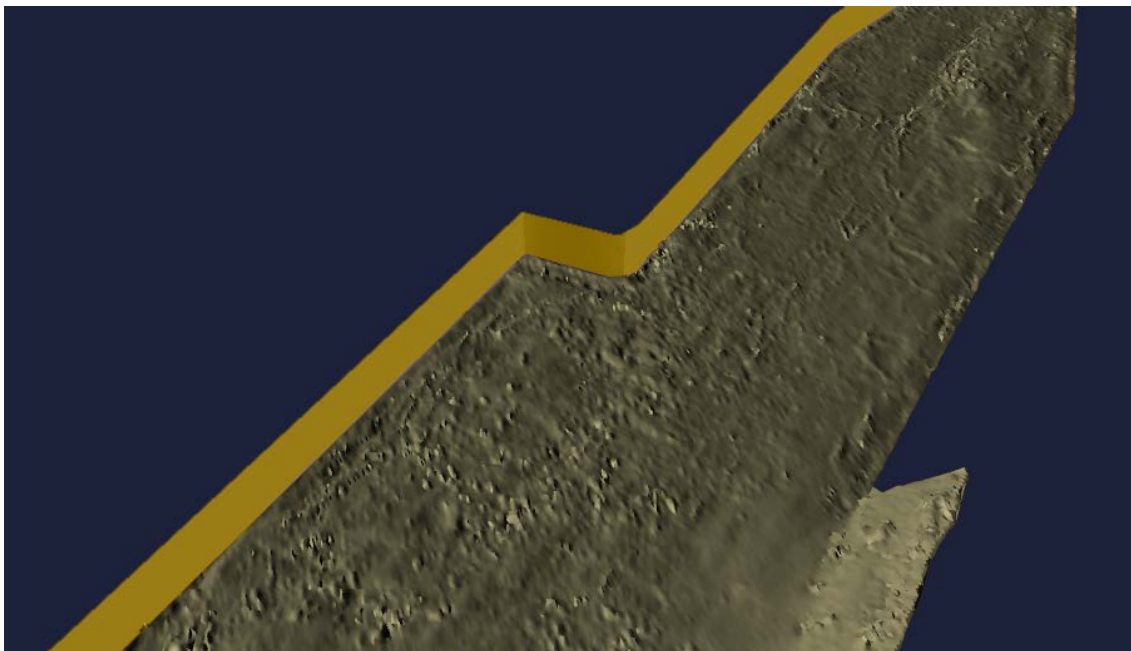
Kuva 65. Taipaleen kanavan pohjasta Delaunayn kolmioinnilla tuotetussa raskaassa mallissa esiintyy artefakteja, mikäli sen rakennetta optimoidaan kevyempään esitysmuotoon. (Kuva: Pekka Helenius)

6.2.2 Taipaleen kanavan vedenalaiset seinät

Vedenalaisiin seinärakenteisiin sovelletut automaattiset mallinnusmenetelmät soveltuvat yksinkertaisiin ja säännöllisen muotoisiin kappaleisiin.

Kanavan vedenalaiset seinät mallinnettiin ruutu- ja vektorimallinnusmenetelmillä. Vektorimallinnusmenetelmissä käytettiin sekä automaattisia että manuaalisia mallinnustapoja, kun taas ruutumallinnuksessa seinämallit tuotettiin automatisoidusti.

Vektorimallinnuksessa vedenalaisista seinistä tuotettiin kaksi erilaatua versiota, joiden tarkkuuteen ja keveyteen liittyneet kriteerit olivat toisistaan poikkeavia erilaisista käyttötarkoituksista johtuen. Raskaammat seinämallit tuotettiin Delaunayn kolmiointimenetelmällä. Kevyemmät seinämallit tuotettiin manuaalisella mallinnusmenetelmällä muodostaen seinien kulmapisteitä mukailevat yksinkertaiset monikulmioverkot (kuva 66). Ne soveltuvat keveyttä edellyttäviin käyttökohteisiin, kun taas Delaunayn kolmioinnilla tuotetut raskaammat mallit soveltuvat yksityiskohtaisuutta vaativiin käyttökohteisiin.



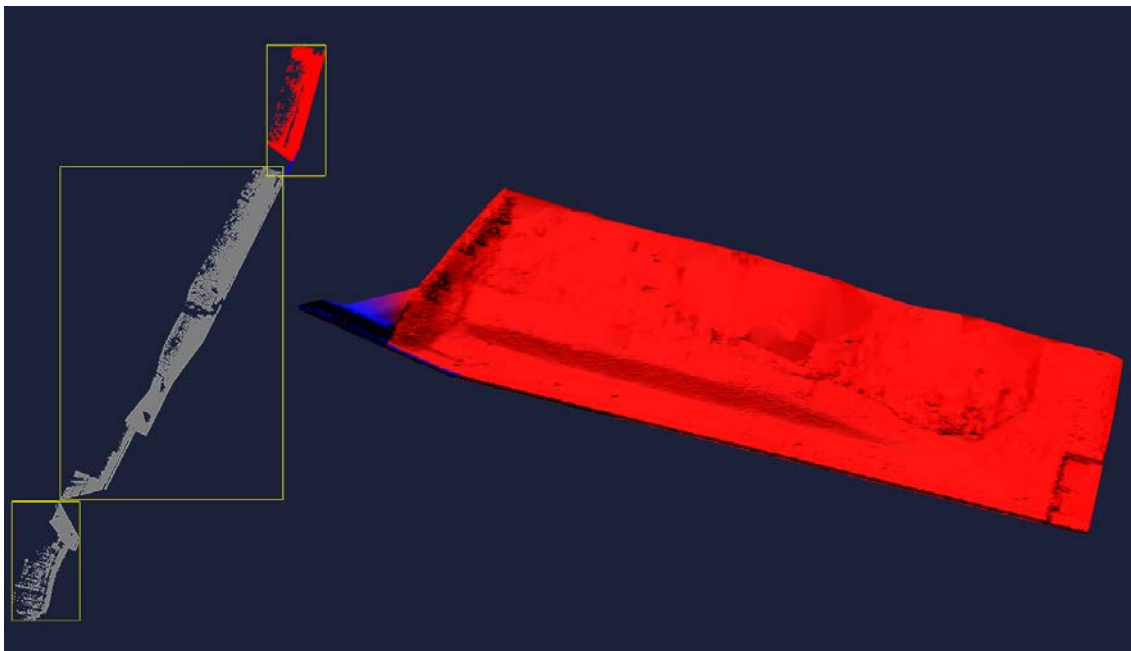
Kuva 66. Ruutumallin pohjalta tuotettu Taipaleen kanavan pohja ja murtoviivoituksella toteutettu lännenpuoleinen, vedenalainen seinä. (Kuva: Pekka Helenius)

Ruutumallinnuksella tuotettujen vedenalaisten seinämallien suurin ongelma on kolmiulotteisten kappaleiden sovitus kaksiulotteiseen ortografiseen projektiotasoon, mikä aiheutti vääristymiä syvyys-suunnissa. Ruutumallin todettiin karkeudesta huolimatta soveltuvan kevyempiin käyttökohteisiin, joiden tarkkuusvaatimukset yksityiskohtien suhteen ovat vähäisemmät.

6.2.3 Taipaleen kanavan vedenpäälliset osat

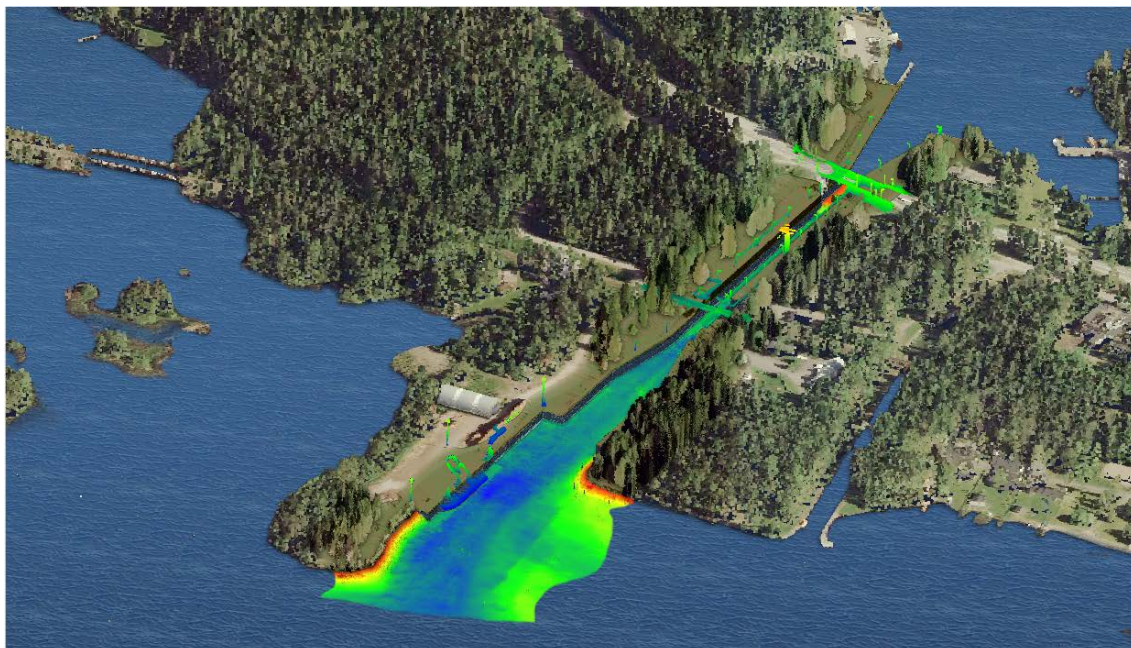
Taipaleen kanavan vedenpäällisistä osista maanpinnan aineisto oli ainoa, joka mallinnettiin. Kanavan vedenpäälliset rakenteet jätettiin mallintamatta, koska automaattiset mallinnus-algoritmit eivät soveltuneet katvealueita sisältävien kappaleiden mallintamiseen. Vedenpäällisten rakenteiden mallinnus edellyttäisi CAD-pohjaista mallinnusta, mikä kasvattaisi aineiston prosessointiin käytettyä kokonaisaikaa ja muodostaisi erillisen työprosessin, jota ei tässä työssä tutkittu.

Maanpinta mallinnettiin Delaunayn kolmiointimenetelmällä sekä itä- ja länsipuolisen laserkeilausaineiston pohjalta. Lännenpuoleinen maanpinta jaoteltiin kolmeen osaan ja mallinnettiin osaotoksia käyttäen (kuva 67).



Kuva 67. Taipaleen kanavan länsipuoleisen laserkeilausaineiston pohjoisosan maanpinnasta Delaunayn kolmioinnilla ja osaotosvälillä 0.40 metriä muodostettu DTM-malli. Osaotokset soveltuvat maanpinnan mallintamiseen ilman mallin tarkkuudessa havaittavia merkittäviä topografisia muutoksia tai vääristymiä. Malliin muodostui ylimääräisiä kolmioita, koska niiden sivujen enimmäispituutta ei rajoitettu ohjelmallisesti. (Kuva: Pekka Helenius)

Kasvillisuutta ei mallinnettu sopivien mallinnusalgoritmien puutteen vuoksi. Esitystavasta ja käyttötarkoituksesta riippuen puustosta tuotettu laserkeilausaineisto voidaan värjätä RGB-väriyksellä (kuva 68) tai vaihtoehtoisesti käyttää kasvillisuutta havainnollistavia yleisluontoisia kolmiulotteisia malleja.



Kuva 68. Taipaleen kanavan aineisto mallinnettuna. Kanavan puusto on RGB-värjätty Maanmittauslaitoksen ortoilmakuva-aineistolla. Kanavaa ympäröivä teksturoitu DSM-malli on tuotettu Maanmittauslaitoksen laserkeilaus- ja ortoilmakuva-aineistosta. (Kuva: Pekka Helenius)

6.3 Käytetty prosessointiaika

Taipaleen kanavan prosessointiin käytetty aika riippui prosessoidusta osiosta ja käytetyistä prosessointimenetelmistä. Ohessa on lueteltu insinöörityössä Taipaleen kanavan pisteaineistojen prosessointiin käytetty aika niin, että vähiten prosessointiaikaa vienyt sekä prosessoinnin kannalta helpoimmaksi koettu osio on ensimmäisenä. Työläimmäksi koettu ja eniten prosessointiaikaa vienyt osio on lueteltu viimeisenä.

- Kanavan pohja
- Vedenalaiset laituriseinät
- Puusto ja kasvillisuus
- Maanpinta
- Pienet geometriset pintarakenteet, kuten tolpat ja seinät

7 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin tietokonepohjaisten mallinnusmenetelmien soveltuvuutta erityyppisiin pisteaineistoihin. Tavoitteena oli kehittää vedenalaisten ja -päällisten aineistojen prosessointia kolmiulotteisen mallintamisen osalta. Pääasiallinen ero vedenalaisen ja vedenpäällisen aineiston välillä oli rakenteiden määrässä ja moniulotteisuudessa: vedenalaisessa aineistossa pienien rakenteiden määrä oli vähäinen ja rakenteet olivat yksinkertaisia, kun taas vedenpäällisessä rakenteita oli huomattavasti enemmän ja ne olivat moniulotteisempia. Työssä havaittiin, että automaattiset mallinnusmenetelmät soveltuvat parhaiten yksiselitteisiin, laajoja rakennekokonaisuuksia muodostaviin aineistoihin, kun taas pieniä rakenteita sisältävät moniulotteisemmat pisteaineistot edellyttävät jossain määrin käsin mallintamista.

Lopputuloksena vedenalaiset aineistot mallinnettiin onnistuneesti asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Vedenpäällisen pisteaineiston mallintamisessa havaittiin haasteita, joita ei työssä esitetyillä menetelmillä kyetty ratkaisemaan. Vedenpäällisen aineiston yksityiskohtaisten kappaleiden mallintaminen edellyttäisi joko CAD-pohjaista mallintamista tai alkuperäisen pisteaineiston täydentämistä katvealueiden osalta. Vaihtoehtoisesti vedenpäälliset osat voisi mallintaa myös fotogrammetrisia eli valokuvaan perustuvia menetelmiä hyödyntäen saatavilla olevan lähdeaineiston puitteissa. Vedenpäällisen aineiston vaihtoehtoisten mallinnusmenetelmien potentiaalin tutkiminen ja työprosessien kuvaaminen edellyttää kuitenkin muuhun aineistoon soveltumattomia ja poikkeavia lähestymistapoja, minkä vuoksi niitä ei insinööriyössä tutkittu.

Työssä tutkittuja automaattisia mallinnusalgoritmeja voisi kehittää ennen kaikkea yksinkertaisten rakenteiden osalta. Automaattiset mallinnusalgoritmit tuottavat rakenteiden ulottuvuudet huomioituna joko tarpeettoman raskaita malleja tai vääriä tulkintoja niiden tosiasiallisesta muodosta. Automaattisilla menetelmillä tuotetut mallit yksinkertaisista rakenteista ovat siis joko raskaita ja oikeamuotoisia tai kevyitä ja vääristyneitä. Vääristyneiden muotojen esiintyvyys ja tiedostojen koolle asetetut ehdot asettavat rajat, kuinka kevyitä malleja esimerkiksi seinien pisteaineistosta voidaan tuottaa automaattisilla menetelmillä.

Yksinkertaisten rakenteiden mallintamisen osalta tilanne menee vielä monimutkaisemmaksi, mikäli yhtenäinen pisteaineisto sisältää sekä yksinkertaisia että monimutkaisia rakenteita, jotka edellyttäisivät erilaisia mallintamistapoja. Tällainen pisteaineisto tulisi

erotella yksinkertaisten ja monimutkaisten rakenteiden osalta, mikä taas manuaalisesti työstettynä lisää aineiston kokonaisprosessointiaikaa.

Tuotettujen mallien visuaalisuuden parantamiseksi tekstuureja ja tekstuurivarjostimia voisi hyödyntää kattavammin. Sopivien teksturointimenetelmien löytäminen ja hyödyntäminen edellyttäisi kuitenkin lisätutkimusta. Tekstuuripintojen kattava hyödyntäminen voisi mahdollistaa visuaaliseen käyttötarkoitukseen tuotettujen mallien monikulmioverkkorakenteiden keventämisen ja pinnan pienten yksityiskohtien esille tuonnin ilman monikulmioiden määrän lisäämistä. Monikulmioiden vähentäminen toisaalta heikentää monikulmioverkkoon sidotun paikkatiedon määrää ja siten koordinaatistoon sidottua topologista mittatarkkuutta monimutkaisissa kappaleissa, mikä täytyy huomioida mallin visuaalisissa ja paikkatiedon laatuun liittyvissä kriteereissä.

Insinööriyössä tutkitut ja käsittelyprosessiin kelvollisiksi havaitut mallinnusmenetelmät soveltuvat monenlaiseen jatkokäyttöön, ja niitä voidaan hyödyntää erityyppisissä käyttökohteissa työn tilaajan intresseistä riippuen.

Lähteet

- 1 Taipaleen kanava. 2016. Verkkodokumentti. Liikennevirasto.
<<http://www.liikennevirasto.fi/vesivaylat/kanavat/taipaleen-kanava#.VsXmw3mxWUI>>. Luettu 18.2.2016.
- 2 Taipaleen kanava kuvituskuva. 2015. Verkkodokumentti. Liikennevirasto.
<<http://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/156748/Taipaleen+kanava+kuvituskuva/03160e08-6b13-458d-9e74-033589793298?t=1447678060125>>. Luettu 18.2.2016.
- 3 Kanavat ja sillat. 2016. Verkkodokumentti. Liikennevirasto.
<<http://www.liikennevirasto.fi/vesivaylat/kanavat#.VsCJu3lIOUI>>. Luettu 18.2.2016.
- 4 Hagman, Aarne. 2011. Varkaus; Taipaleen vanha kanava. Verkkodokumentti. Panoramio. <<http://static.panoramio.com/photos/large/53789959.jpg>>. Luettu 24.2.2016.
- 5 Valtakunnallisesti merkittävät rakennetut kulttuuriympäristöt RKY, Taipaleen kanavat. 2009. Verkkodokumentti. Museovirasto.
<http://www.rky.fi/read/asp/r_kohde_det.aspx?KOHDE_ID=1055>. Luettu 18.2.2016.
- 6 Sarkkinen, Paavo & Rekonen, Timo & Koivupuro, Seppo. 2007. Suomen Sisävesiväylät - Rakentaminen ja kehitys, Taipaleen uitto- ja laivasulku. Jyväskylä: Multikustannus Oy.
- 7 Valtakunnallisesti merkittävät rakennetut kulttuuriympäristöt RKY, Taipaleen kanavat, kohdekartta. 2009. Verkkodokumentti. Museovirasto.
<http://www.rky.fi/read/asp/r_kohde_kartta.aspx?KOHDE_ID=1055&OBJECTID=24226>. Luettu 18.2.2016.
- 8 Ahvenisto, Ursula & Borén, Esa & Hjelt, Sven-Erik & Karjalainen, Tuija & Sirviö, Jarmo. 2004. Geofysiikka. Porvoo Helsinki: WSOY.
- 9 Noukka, Mirja & Sikiö, Tero. 2016. Kanavaliikennemääräykset - Liikenneviraston määräykset aluksille ja puutavarautoille asetettavista vaatimuksista valtion sulku- ja avokanavilla sekä avattavilla silloilla. PDF-dokumentti. Liikennevirasto. Saatavilla:
<http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf5/2016_kanavaliikennemaaraykset.pdf>. Luettu 30.7.2016.
- 10 Historia. 2015. Verkkodokumentti. Meritaito Oy.
<<http://www.meritaito.fi/meritaito/historia.html>>. Luettu 18.2.2016.

- 11 Viitat ja poijut. 2015. Verkkodokumentti. Meritaito Oy.
<<http://www.meritaito.fi/viitat-ja-pojjut.html>>. Luettu 18.2.2016.
- 12 Syvyyskartoitukset. 2015. Verkkodokumentti. Meritaito Oy.
<<http://www.meritaito.fi/tutkimukset-ja-suunnittelu/syvyyskartoitukset.html>>. Luettu 18.2.2016.
- 13 Rakennetutkimukset. 2015. Verkkodokumentti. Meritaito Oy.
<<http://www.meritaito.fi/tutkimukset-ja-suunnittelu/rakennetutkimukset.html>>. Luettu 18.2.2016.
- 14 Tutkimukset ja suunnittelu. 2015. Verkkodokumentti. Meritaito Oy.
<<http://www.meritaito.fi/tutkimukset-ja-suunnittelu.html>>. Luettu 18.2.2016.
- 15 Teoreettinen keskivesi (MW) ja geodeettiset korkeusjärjestelmät Suomessa. 2016. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos.
<<http://ilmatieteenlaitos.fi/keskivesitaulukot>>. Luettu 17.9.2016.
- 16 Pöllänen, Anssi & Kurtti, Hanno. 2015. Taipaleen kanavan rakennetarkastus, yleistarkastusraportti. PDF-dokumentti. Meritaito Oy.
- 17 Leirimaa, Olli. 2015. Monikeilaus- ja mobiililaserkeilausaineistojen yhdistäminen vesirakenteiden mittauksessa. Insinöörityo. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Saatavilla:
<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/99934/Leirimaa_Olli.pdf>.
- 18 L-3 Communications SeaBeam Instruments. 2000. Multibeam Sonar, Theory of Operation. Columbia University, New York, USA. Saatavilla:
<<http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/MB-System/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf>>. Luettu 4.1.2016.
- 19 Smed, Jouni. 2002. Digitaalisen äänenkäsittelyn perusteet. Kurssimateriaali. Turun yliopisto. Saatavilla:
<<http://staff.cs.utu.fi/~jounsmed/dap06/slides/slides061101.pdf>>. Luettu 24.2.2016.
- 20 Niskanen, Patrik. 2016. Merenpohjan luokittelu monikeilainkalkulaution perusteella. Diplomityö. Aalto-yliopisto.
- 21 Maleika, Wojciech. 2012. Development of a Method for the Estimation of Multibeam Echo-sounder Measurement Accuracy. West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland. Saatavilla:
<<http://pe.org.pl/articles/2012/10b/54.pdf>>. Luettu 4.1.2016.
- 22 Kukko, Antero. 2013. Mobile Laser Scanning - System development, performance and applications. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Saatavilla:
<<http://lib.tkk.fi/Diss/2013/isbn9789517113076/isbn9789517113076.pdf>>.

- 23 Briese, Christian & Pfeifer, Norbert. 2007. Laser Scanning - Principles And Applications. Vienna University of Technology, Vienna, Austria. Saatavilla: <http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_1951.pdf>. Luettu 5.1.2016.
- 24 Briese, Christian & Zach, Gerald & Verhoeven, Geert & Ressler, Camillo & Ullrich, Andreas & Studnicka, Nikolaus & Doneus, Michael. 2012. Analysis of Mobile Laser Scanning Data and Multi-view Image Reconstruction. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Saatavilla: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B5/163/2012/isprsarchives-XXXIX-B5-163-2012.pdf>>. Luettu 22.2.2016.
- 25 Toth, Charles K. & Petrie, Gordon. 2008. Terrestrial Laser Scanners. Purdue University, Indiana, USA. Saatavilla: <ftp://ftp.ecn.purdue.edu/jshan/Zproject/proofs/03/51423_C003_CT.pdf>. Luettu 22.2.2016.
- 26 Gebhard, Harald & Weber, Georg. 2003. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol - Ntrip, Version 1.0. Federal Agency for Cartography and Geodesy, Frankfurt, Germany. Saatavilla: <http://www.wsrn.org/CONTENT/Reference/Reference_NTRIP-V1-Tech-paper.pdf>. Luettu 14.2.2016.
- 27 Satelliittimittaus eli GPS-mittaus. 2016. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos. <<http://www.maanmittauslaitos.fi/ammattilaisille/maastotiedot/koordinaattikorkeusjarjestelmat/etrs89-euref-fin/satelliittimittaus-eli-gps-mittaus>>. Luettu 13.2.2016.
- 28 Langley, Richard B. 1999. Dilution of Precision. University of New Brunswick, Fredericton, Canada. Saatavilla: <http://www.nrem.iastate.edu/class/assets/nrem446_546/week3/Dilution_of_Precision.pdf>. Luettu 13.2.2016.
- 29 Cai, Changsheng & Gao, Yang & Pan, Lin & Zhu, Jian-Jun. 2015. Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. Elsevier Science Ltd. Saatavilla: <https://www.researchgate.net/profile/Changsheng_Cai/publication/276120537_Precise_point_positioning_with_quad-constellations_GPS_BeiDou_GLONASS_and_Galileo/links/555ea7f508ae8c0cab2c7832.pdf>. Luettu 23.2.2016.
- 30 Koenig, Kevin. 2014. Everything You Ever Wanted to Know About Marine Stabilizers. Verkkodokumentti. Cruz Bay Publishing Inc. <<http://www.powerandmotoryacht.com/refit-and-upgrade/everything-you-ever-wanted-know-about-marine-stabilizers#.VziayyZM5p>>. Luettu 15.5.2016.
- 31 Heritage, George & Large, Andy & Charlton, Martin. 2009. Laser Scanning for the Environmental Sciences. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons Ltd.

- 32 Faragher, Ramsey. 2012. Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation. University of Cambridge, Cambridge, U.K. Saatavilla: <<https://www.cl.cam.ac.uk/~rmf25/papers/Understanding%20the%20Basis%20of%20the%20Kalman%20Filter.pdf>>. Luettu 23.2.2016.
- 33 Käyhkö, Jukka. 2010. Geomorfologian luennot 6 - Eksogeeniset prosessit III, fluviaaliprosessit. Kurssimateriaali. Turun yliopisto.
- 34 Debese, Nathalie. 2007. Multibeam Echosounder Data Cleaning Through an Adaptive Surface-based Approach. Hydrographic and Oceanographic Service of the French Navy. Saatavilla: <http://ushydro.thsoa.org/hy07/02_01.pdf>. Luettu 4.1.2016.
- 35 Parabolinen peiliantenni. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Parabolinen_peiliantenni>. Luettu 18.9.2016.
- 36 Bonham-Carter, Graeme F. 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Oxford, U.K.: Pergamon Press.
- 37 Seppälä, Antti. 2001. Pintoja kuvaavien verkkojen muodostaminen ja optimointi. Pro gradu -tutkielma. Tampereen yliopisto. Saatavilla: <http://tampub.uta.fi/bitstream/handle/10024/89295/Seppala_Antti.pdf>.
- 38 Heidemann, Hans Karl. 2014. Lidar Base Specification. U.S. Geological Survey, Reston, USA. Saatavilla: <<https://pubs.usgs.gov/tm/11b4/pdf/tm11-B4.pdf>>. Luettu 23.1.2016.
- 39 DEM, DSM & DTM Differences – GIS Elevation Models. 2016. Verkkodokumentti. GISGeography.com. <<http://gisgeography.com/dem-dsm-dtm-differences>>. Luettu 25.2.2016.
- 40 First Global Topographic Map of Mercury Released. 2016. Verkkodokumentti. The United States Geological Survey. <<https://www.usgs.gov/news/first-global-topographic-map-mercury-released>>. Luettu 6.5.2016.
- 41 Vosselman, George & Maas, Hans-Gerd. 2010. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Dunbeath, Scotland, U.K.: Whittles Publishing.
- 42 Las Specification, Version 1.1, 07.03.2005. 2005. Verkkodokumentti. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. <http://asprs.org/a/society/committees/standards/asprs_las_format_v11.pdf>. Luettu 26.2.2016.
- 43 Toivanen, Jukka Ilari. 2004. 3D-verkon generointi hybridimenetelmällä. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto. Saatavilla: <<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/12493/G0000589.pdf>>.

- 44 Karttunen, Hannu. 2016. Interpolointi. Verkkodokumentti. Ursa, Tuorlan observatorio. Saatavilla: <<http://www.astro.utu.fi/zubi/math/interpol.htm>>. Luettu 1.3.2016.
- 45 Raster Data and Vector Data. 2016. Verkkodokumentti. High Point, NC. <<http://www.highpointnc.gov/DocumentCenter/View/1899>>. Luettu 26.2.2016.
- 46 GIS Spatial Data Types: Vector vs Raster. 2016. Verkkodokumentti. GISGeography.com. <<http://gisgeography.com/spatial-data-types-vector-raster>>. Luettu 26.2.2016.
- 47 TIN. 2016. Verkkodokumentti. Environmental Systems Research Institute. <<http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/TIN>>. Luettu 8.3.2016.
- 48 Jakobsson, Antti & Kettunen, Pyry & Koistinen, Kai & Koivula, Hanna & Kosunen, Riina & Laine, Mikko & Lehto, Lassi & Myllymäki, Tarja & Rainio, Antti & Ruotsalainen, Reino & Tiainen, Esa & Valanne, Kirsi & Seppälä, Saku. 2014. Geoinformatiikan sanasto 2014, TSK 45. Sanastokeskus TSK ry. Saatavilla: <<http://www.tsk.fi/tiedostot/pdf/GeoinformatiikanSanasto.pdf>>. Luettu 26.2.2016.
- 49 Vertices, Edges and Faces. 2016. Verkkodokumentti. The Blender Foundation. <http://wiki.blender.org/index.php/Doc:2.4/Manual/Modeling/Meshes/Mesh_Structures>. Luettu 26.2.2016.
- 50 Foley, James D. & van Dam, Andries & Feiner, Steven K. & Hughes, John F. 1997. Computer Graphics: Principles and Practice. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- 51 3.1 Tangent plane and surface normal. 2009. Verkkodokumentti. Massachusetts Institute of Technology. <<http://web.mit.edu/hyperbook/Patrikalakis-Maekawa-Cho/node27.html>>. Luettu 26.2.2016.
- 52 Kangasaho, Jukka & Mäkinen, Jukka & Oikkonen, Juha & Paasonen, Johannes & Salmela, Maija & Tahvanainen, Jorma & Söderström, Werner. 2005. Pitkä matematiikka: Analyttinen Geometria. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.
- 53 Face and Vertex Normal Vectors (Direct3D 9). 2016. Verkkodokumentti. Microsoft. <<https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/bb173380%28v=vs.85%29.aspx>>. Luettu 26.2.2016.
- 54 Double Sided, Or Two Sided Meshes, With Materials Either Side In Blender 3D. 2016. Verkkodokumentti. KatsBits. <<http://www.katsbits.com/tutorials/blender/double-sided-faces-different-materials.php>>. Luettu 27.2.2016.
- 55 Diagonals of a Polygon. 2009. Verkkodokumentti. Math Open Reference. <<http://www.mathopenref.com/polygondiagonal.html>>. Luettu 28.2.2016.

- 56 Cheng, Siu-Wing & Dey, Tamal Krishna & Shewchuk, Jonathan Richard. 2013. Delaunay Mesh Generation. New York, USA: CRC Press.
- 57 3.5.2 Deterministiset interpolointimenetelmät. 2003. Verkkodokumentti. VirtuaaliAMK.
<<http://kronos.ncp.fi/koulutusohjelmat/metsa/PaikkatietoWWW/Analyysi/IntpMene1.htm>>. Luettu 28.2.2016.
- 58 Kazhdan, Michael & Bolitho, Matthew & Hoppe, Hugues. 2006. Poisson Surface Reconstruction. PDF-dokumentti. Johns Hopkins University & Microsoft Research, USA. Saatavilla: <<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/hoppe/poissonrecon.pdf>>. Luettu 28.2.2016.
- 59 Alliez, Pierre & Saboret, Laurent & Guennebaud, Gaël. 2016. CGAL 4.9 - Surface Reconstruction from Point Sets. Verkkodokumentti.
<http://doc.cgal.org/latest/Surface_reconstruction_points_3/>. Luettu 17.9.2016.
- 60 UV Mapping a Mesh. 2016. Verkkodokumentti. Blender Foundation.
<https://www.blender.org/manual/de/editors/uv_image/uv_editing/unwrapping.html>. Luettu 23.2.2016.
- 61 Nivala, Timo. 2014. CAVE-ohjelmiston kehitys Unity-pelimootorille. Opinnäytetyö. Centria Ammattikorkeakoulu. Saatavilla:
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/76041/Nivala_Timo.pdf>.
- 62 Kansanaho, Jarno. 2011. Tilanhallintatekniikat 3D-grafiikkamoottoreissa. Pro gradu -esitelmä. Jyväskylän yliopisto. Saatavilla:
<http://users.jyu.fi/~tk/opetus/kevat11/Tilanhallintatekniikat_3D_grafiikkamoottoreissa.pdf>.
- 63 Hornus, Samuel & Lefebvre, Sylvain & Neyret, Fabrice. 2005. Octree Textures on the GPU. Verkkodokumentti.
<http://www.antexel.com/sylefeb/octreetex/octree_textures_on_the_gpu.pdf>. Luettu 20.2.2016.
- 64 What is raster data?. 2008. Verkkodokumentti. Environmental Systems Research Institute.
<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=What_is_raster_data%3F>. Luettu 25.2.2016.
- 65 Erving, Anna. 2007. Julkisivutekstuurin liittäminen 3D-malliin. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Saatavilla:
<<https://foto.aalto.fi/publications/diplomityot/koko/Erving.pdf>>.
- 66 Maleika, Wojciech. 2014. The influence of the grid resolution on the accuracy of the digital terrain model used in seabed modeling. West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland. Saatavilla:
<<http://download.springer.com/static/pdf/600/art%253A10.1007%252Fs11001->

014-9236-
 6.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs1
 1001-014-9236-
 6&token2=exp=1458228858~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F600%2Fart%25253A10.
 1007%25252Fs11001-014-9236-
 6.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%
 252F10.1007%252Fs11001-014-9236-
 6*~hmac=855a715e91e634a224caa2593b3a19b53946bde181ca4fdd19652595e
 0b88015>. Luettu 24.2.2016.

- 67 Järvinen, Jouni. 2009. Johdatus Informaatioteknologiaan 1. Kurssimateriaali. Tu-
 run Yliopisto.